

Aus der Klinik für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie,  
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar  
Direktor: Prof. Dr. med. Wolfgang Reith

Mentale Rotation: Beziehung zur Gehirnreifung und zu  
mathematischen Fertigkeiten

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin*  
*der Medizinischen Fakultät*  
der  
UNIVERSITÄT DES SAARLANDES  
2016

vorgelegt von: Tobias Holger Woerner

geb. am: 15.03.1990 in Zweibrücken

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Summary.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Mentale Rotation .....</i>	4
2.1.1	Was ist Mentale Rotation? .....	4
2.1.2	Mentale Rotation bei Kindern und Erwachsenen.....	4
2.1.3	Aufgaben zur Mentalen Rotation - Analytische oder holistische Bearbeitung? .....	5
2.1.4	Die Rolle des Parietallappen bei der Mentalen Rotation .....	6
2.1.5	Der Frontallappen als Repräsentant der Motorik bei Mentaler Rotation.....	7
2.1.6	Das Arbeitsgedächtnis – Voraussetzung für erfolgreiche Mentale Rotation .....	9
2.2	<i>Mentale Rotation im Altersgefüge .....</i>	9
2.3	<i>Hypothesen .....</i>	11
2.3.1	Hypothese 1: Altersabhängigkeit des <i>Intraparietalsulcus (IPS)</i> .....	11
2.3.2	Hypothese 2: Beziehung zwischen <i>IPS</i> -Aktivität und Zahlenverarbeitung.....	11
<b>3</b>	<b>Material und Methode.....</b>	<b>12</b>
3.1	<i>Probandenakquirierung .....</i>	12
3.2	<i>Probandenstruktur .....</i>	12
3.3	<i>Tag der Messung .....</i>	14
3.3.1	Fragebogen.....	14
3.3.2	Vorbereitung zur Messung .....	18
3.3.3	Kernspinmessung.....	19
3.3.4	Paradigma.....	21
3.4	<i>Auswertung der Verhaltens- und Fragebogendaten.....</i>	23
3.5	<i>Auswertung der Bilddaten.....</i>	24
3.5.1	Slice Time Korrektur .....	24
3.5.2	Realignment .....	24
3.5.3	Koregistrierung .....	25
3.5.4	Normalisierung (Normalize) .....	25
3.5.5	Glätten (Smoothing) .....	26
3.5.6	Modell Schätzung und Statistik .....	26
3.5.7	Anatomische Zuordnung der Aktivierungsareale .....	28
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>29</b>
4.1	<i>Ergebnisse der funktionellen MRT Daten.....</i>	29
4.1.1	Das Verarbeitungszentrum der Mentalen Rotation.....	29
4.1.2	Die Verarbeitung der Mentalen Rotation im Laufe der Entwicklung.....	33
4.2	<i>Ergebnisse der Verhaltens- und Fragebogendaten .....</i>	38
4.2.1	Verarbeitungszeiten .....	38
4.2.2	Einflussfaktoren auf die Aktivierung des <i>IPS</i> bei Mentaler Rotation .....	39
4.2.3	Einflussfaktoren auf den Parameter „Fehler Polygone“ .....	44
4.2.4	Einflussfaktoren auf den Parameter „Alter“ .....	45
4.2.5	Einflussfaktoren auf den Parameter „Abweichungen vom Zahlenstrahl“ .....	46
4.2.6	Einflussfaktoren auf den Parameter „Note in Mathematik“ .....	47
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Diskussion der Methodik.....</i>	49
5.2	<i>Diskussion der Ergebnisse aus den funktionellen MRT Daten .....</i>	50
5.2.1	Die Verarbeitungszentren der Mentalen Rotation.....	50
5.2.2	Die Mentale Rotation im Altersgefüge.....	52
5.3	<i>Diskussion der Ergebnisse aus den Verhaltens- und Fragebogendaten .....</i>	54
5.3.1	Verarbeitungszeiten .....	54

5.3.2	Einflussfaktoren auf die Aktivierung des <i>IPS</i> bei Mentaler Rotation .....	54
5.3.3	Einflussfaktoren auf den Parameter „Fehler Polygone“ .....	56
5.3.4	Einflussfaktoren auf den Parameter „Alter“ .....	57
5.3.5	Einflussfaktoren auf den Parameter „Note in Mathematik“ .....	58
5.4	<i>Ausblick</i> .....	58
5.5	<i>Einschränkungen dieser Studie</i> .....	59
5.6	<i>Schlussfolgerung</i> .....	60
<b>Literaturverzeichnis</b> .....		<b>61</b>
<b>Anhang</b> .....		<b>66</b>
<b>Publikation</b> .....		<b>79</b>
<b>Danksagung</b> .....		<b>80</b>
<b>Lebenslauf</b> .....		Fehler! Textmarke nicht definiert.

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

ABB. 1:	GESCHLECHTERVERTEILUNG DER PROBANDEN.....	13
ABB. 2:	ALTERSSTRUKTUR DER PROBANDEN.....	13
ABB. 3:	VERTEILUNG DER PROBANDEN AUF SCHULARTEN.....	14
ABB. 4:	KOPFRECHENAUFGABE.....	15
ABB. 5:	ZAHNRADAUFGABE.....	16
ABB. 6:	ZAHLENSTRAHLAUFGABE.....	17
ABB. 7:	SCHACHTELAUFGABE.....	18
ABB. 8:	MRT-SEQUENZEN.....	20
ABB. 9:	ZAHLENVERGLEICHSAUFGABE.....	22
ABB. 10:	AUFGABE ZUR MENTALEN ROTATION.....	23
ABB. 11:	VORVERARBEITUNG: DARSTELLUNG DES REALIGNMENT.....	25
TAB. 12:	ÜBERSICHT DER ANGEWANDTEN KONTRASTE ZUR ERSTELLUNG EINES STATISTISCHEN MODELLS.....	27
ABB. 13:	RENDERDARSTELLUNG KONTRAST „ROTATION60“.....	30
TAB. 14:	STATISTISCHE ANALYSE DES KONTRAST „ROTATION60“.....	31
ABB. 15:	KONTRAST „ROTATION60“ MIT MASKE ZUR PARIETALREGION ÜBERLAGERT.....	31
ABB. 16:	SCHNITTEBENEN-DARSTELLUNG KONTRAST „ROTATION60“ MIT PARIETALREGIONMASKE.....	32
ABB. 17:	RENDERDARSTELLUNG VON KONTRAST „ROTATION60“ KORRELIERT MIT ALTER.....	34
TAB. 18:	STATISTISCHE ANALYSE DES KONTRAST „ROTATION60“ KORRELIERT MIT ALTER.....	35
ABB. 19:	SCHNITTEBENEN-DARSTELLUNG KONTRAST „ROTATION60“ KORRELIERT MIT ALTER.....	35
ABB. 20:	SCHNITTEBENEN-DARSTELLUNG KONTRAST „ROTATION60“ MIT UND OHNE ALTERSKORRELATION.....	37
ABB. 21:	AKTIVIERBARKEIT LINKER IPS DURCH MENTALE ROTATION KORRELIERT MIT ALTER.....	38
ABB. 22:	SCHAUBILDER DER VERARBEITUNGSZEITEN BEI DEN AUFGABEN IM MRT-SCANNER.....	39
TAB. 23:	KORRELATION AKTIVIERUNG LINKER IPS BEI MENTALER ROTATION MIT ALTER.....	40
TAB. 24:	KORRELATION AKTIVIERUNG LINKER IPS BEI MENTALER ROTATION MIT FEHLER POLYGONE.....	40
ABB. 25:	ALTERSGRUPPIERTE AUFTRAGUNG VON „FEHLER POLYGONE“ GEGENÜBER „AKTIVIERBARKEIT DES LINKEN IPS“.....	41
TAB. 26:	STUFIGES REGRESSIONSMODELL BEZÜGLICH DER AKTIVIERUNG IM LINKEN IPS BEI MENTALER ROTATION.....	42
TAB. 27:	KOEFFIZIENTEN DER REGRESSIONSANALYSE AUS TAB. 26.....	43
TAB. 28:	KORRELATION „FEHLER POLYGONE“ MIT VERHALTENS- UND FRAGEBOGENDATEN.....	44
TAB. 29:	REGRESSIONSMODELL BEZÜGLICH DER „FEHLER POLYGONE“.....	45
TAB. 30:	KOEFFIZIENTEN DER REGRESSIONSANALYSE AUS TAB. 29.....	45
TAB. 31:	KORRELATION „ALTER“ MIT VERHALTENS- UND FRAGEBOGENDATEN.....	46
TAB. 32:	REGRESSIONSMODELL BEZÜGLICH DER ABWEICHUNGEN AUF DEM ZAHLENSTRAHL.....	46
TAB. 33:	KOEFFIZIENTEN DER REGRESSIONSANALYSE AUS TAB. 32.....	47
TAB. 34:	KORRELATION „NOTE IN MATHEMATIK“ MIT AKTIVIERUNG LINKER IPS BEI MENTALER ROTATION.....	47
TAB. 35:	REGRESSIONSMODELL BEZÜGLICH DER NOTE IN MATHEMATIK.....	48
TAB. 36:	KOEFFIZIENTEN DER REGRESSIONSANALYSE AUS TAB. 35.....	48

## Abkürzungsverzeichnis

(f)MRT	(funktionelle) Magnetresonanztomographie
%	Prozent
°	Grad
Abb.	Abbildung
ANOVA	Analysis of variance
BOLD	Blood oxygenation level dependent
FWE	Familywise error
GM	Grey matter (Graue Substanz)
IPL	Inferiorer Parietallappen
<i>IPS</i>	<i>Intraparietalsulcus</i>
korr.	korrigiert
MP-RAGE	Magnetization prepared rapid acquisition of gradient echo
PET	Positronenemissionstomographie
PL	Parietallappen
pMd	Dorsaler prämotorischer Kortex
PT	Processing time (Verarbeitungszeit)
SD	Schichtdicke
SOL	Selbstorganisiertes Lernen
SPL	Superiorer Parietallappen
Tab.	Tabelle
TE	Time of echo
TR	Time of repeat
V5	Visueller Kortex V5
VBM	Voxel based morphometry
Voxel	Volumenpixel
WM	White matter (Weiße Substanz)

## 1 Zusammenfassung

Die Mentale Rotation ist nach dem heutigen Stand der Wissenschaft eine Hirnfunktion, die durch das Zusammenwirken unterschiedlichster Hirnareale gekennzeichnet ist und einer altersbedingten Entwicklung unterliegt.

Diese Studie beschäftigt sich mit der Entwicklung der mentalen Rotation vom Kindes- zum Erwachsenenalter und berücksichtigt dabei insbesondere die Entwicklungsdynamik sowie deren Einflussfaktoren. 135 Probanden im Alter von 8-19 Jahren mussten Aufgaben zur Mentalen Rotation bearbeiten. Währenddessen wurden funktionelle Magnetresonanztomographie-Aufnahmen erstellt, aus denen Aktivitätslandkarten generiert werden konnten. Zudem mussten die Probanden im Vorhinein einen Fragebogen ausfüllen, der weitere Aufgaben zur räumlich-mentalen Performanz umfasste. Ferner wurde die Mathematiknote, eine Selbsteinschätzung des Leistungsniveaus sowie die Herangehensweise an die Aufgabenstellungen erfragt. Mit Hilfe der Aktivitätslandkarten konnten die Hauptareale für die Mentale Rotation jeweils beidseits in den Parietallappen, im dorsalen prämotorischen Kortex sowie in der tertiären Sehrinde lokalisiert werden. Bei entwicklungsbezogenen Betrachtungen stellte sich der linke *Intraparietalsulcus* als einzige Region heraus, die einer signifikanten, stetigen Zunahme der Aktivierbarkeit im Laufe der Reifung unterlag. Ebenso zeigte sich eine altersabhängige Steigerung der Fähigkeit zur Mentalen Rotation. Im Altersbereich von 12 bis 14 Jahren stellte ich jedoch eine Verlangsamung dieser Entwicklung fest. Die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Aktivierung des linken *Intraparietalsulcus* erbrachte das Ergebnis, dass unter vielen untersuchten Variablen nur das Alter und die räumlich-mentale Performanz einen signifikanten Einfluss auf die Aktivierung aufwiesen. In Bezug auf schulische Leistungen konnte dargestellt werden, dass die Aktivierbarkeit des linken *Intraparietalsulcus* durch Mentale Rotation einen signifikanten Einfluss auf die Mathematiknote hat.

In Zusammenschau des vorpublizierten Wissens über die spezifische Trainierbarkeit von Hirnarealen und der neugewonnenen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Aktivierbarkeit des linken *Intraparietalsulcus* und der Mathematiknote könnten die Ergebnisse dieser Studie helfen, mathematische Probleme zu lösen und die Mathematiknote von Schülern zu verbessern.

## 1 Summary

Mental Rotation is a brain function which needs coordination of different brain regions. Moreover this mental ability shows age related changes. This study examines the development of Mental Rotation from childhood to adolescence. It focuses both the dynamic of the development and intermediating factors between brain maturation and numerical cognition.

135 subjects aged between 8 and 19 years voluntarily joined this MRI study concerning Mental Rotation. Both functional and structural MRI-scans have been recorded. These scans were needed to assess proband's maps of activity. Before start of the scans, the subjects were asked to fill in a questionnaire. This questionnaire included further tasks concerning spatial-mental performance, questions about abilities in mathematics, about self-assessment of the own performance level and about the way to reach a solution of Mental Rotation tasks.

This study shows functional centers for Mental Rotation in parietal lobes, the dorsal praemotoric cortex and the tertiary visual cortex. Additional results point out the left *sulcus intraparietalis* as the only brain region, which presents a significant age related increase of activity. Furthermore the ability for Mental Rotation rises during maturation, but aged between 12 and 14 years this dynamics shows some slowing. The only significant influencing factors for the activity of the left *sulcus intraparietalis* are the variables „age“ and „spatial-mental performance“. Hence it could be presented here, that the activity of the left *sulcus intraparietalis* has a significant influence on the performance in mathematics of pupils.

The previously published knowledge of the specific trainability of brain regions matched with the results of this study. The found influencing factors between brain maturation and numerical performance may explain mathematical problems as well as neural development of mathematical abilities during school education.

## 2 Einleitung

In unserem alltäglichen Leben ist der Mensch mit einer Vielzahl an Herausforderungen konfrontiert. Dies kann eine große Spannweite an Anforderungen an das Individuum stellen, sei es zum Beispiel sprachlicher, arithmetischer oder räumlicher Natur. Diese Aufgaben erfüllen wir meist ohne uns darüber im Klaren zu sein, welche Leistung dazu überhaupt nötig ist. Ohne räumliches Vorstellungsvermögen wäre es zum Beispiel undenkbar, ein Auto sicher in eine Parklücke zu navigieren sowie einen Ball zu werfen oder zu fangen. Ebenso wäre das Bezahlen einer Rechnung oder das Einkaufen von Lebensmitteln ohne arithmetische Vorbildung undenkbar. Diese Fähigkeiten sind dem Menschen nicht von Geburt an gegeben, sondern müssen sich erst entwickeln.

Doch wie entwickeln sich diese Leistungen, welche Faktoren haben Einfluss darauf und was für Rückschlüsse kann man aus dem Wissen über den Vorgang der Entwicklung ziehen? Dies sind alles Fragen, die ich im Rahmen dieser Studie näher beleuchten möchte.

Die Forschung befasst sich ausgedehnt mit der zerebralen Verarbeitung dieser einzelnen Kulturleistungen, meist anhand von Untersuchungen erwachsener Probanden. Da sich das Erlernen dieser Fähigkeiten jedoch im Kindes- und Jugendalter abspielt und sich dieser Prozess noch weitestgehend unerforscht darstellt, konzentrierte ich mich auf die jugendliche Gehirnreifung. Als Korrelat für das räumliche Vorstellungsvermögen wählte ich die Mentale Rotation. Ebenso wurden als Kontrollaufgabe und zur Gewinnung eigenständiger Daten auch zahlenspezifische Aspekte, welche die mentale Zahlenverarbeitung repräsentieren, untersucht.

Ich untersuchte Kinder im Alter von 8 bis 19 Jahren anhand von Fragebögen und mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT). In den Fragebögen sollten die Probanden ihre eigene schulische Leistung einschätzen und einen Aufgabenteil absolvieren. Die Informationen aus der funktionellen Bildgebung nutzte ich zur Lokalisierung der beanspruchten Hirnareale. Wichtige Informationen über die Herangehensweise und den Leistungsfortschritt der einzelnen Probanden erhielt ich aus Verhaltensdaten, die ich zum einen aus der eigenen Performanz der Probanden bei den Aufgaben während der Messung und zum anderen aus den Fragebögen gewonnen hatte.

Die während der Kernspinuntersuchung zu lösenden Aufgaben waren abwechselnd zu dem Themengebiet der mentalen Zahlenverarbeitung und der mentalen Rotation angeordnet. Zuerst wurden rein anatomische 3D-Bilder des Probandengehirns erhoben. Während der



Aufgabenbewältigung wurden Sequenzen, welche den BOLD Effekt ausnutzen, zur Bildakquirierung vollzogen. Der BOLD Effekt macht sich die Tatsache zu Nutzen, dass beanspruchte im Vergleich zu nicht beanspruchten Hirnarealen mehr Sauerstoff benötigen und desoxygeniertes Hämoglobin im Gegensatz zu oxygeniertem Hämoglobin einen Signalunterschied darstellt [Logothetis *et al.*, 2001]. Dieser Signalunterschied dient als indirektes Zeichen der Aktivitätsänderung dieses Areals [Blakemore und Mills, 2014, Tamnes *et al.*, 2010].

## **2.1 Mentale Rotation**

### **2.1.1 Was ist Mentale Rotation?**

Die räumliche Fähigkeit wird in 3 Hauptfaktoren unterteilt, die Mentale Rotation, die räumliche Veranschaulichung (Spatial Visualization) und die räumliche Orientierung (Spatial Perception) [Linn und Petersen, 1985, Shepard und Metzler, 1971]. Die Mentale Rotation umfasst die Fähigkeit, räumliche Information mental zu codieren und diese Codierung auch mental zu transformieren. Dazu müssen symbolische, nicht sprachliche Informationen erst mental repräsentiert, darauf transformiert und nach einer Codierung neu abgerufen werden. Je nach Aufgabe werden diese dann mit Informationen aus dem Arbeitsgedächtnisses verglichen [Linn und Petersen, 1985]. Dies bedeutet, dass ein zu rotierendes Objekt zunächst in ein mentales Abbild überführt wird. Daraufhin wird die Mentale Rotation geplant und ausgeführt. Als letztes muss das Abbild der im Arbeitsgedächtnis gespeicherten gerade stattgefundenen Mentalen Rotation mit einem Referenzobjekt verglichen werden [Booth *et al.*, 2000].

### **2.1.2 Mentale Rotation bei Kindern und Erwachsenen**

Lohmann stellte 1979 heraus, dass die Mentale Rotation relativ unabhängig von den anderen beiden räumlichen Fähigkeiten zu sein scheint und ein gutes Korrelat für die eigentliche Leistung der räumlichen Fähigkeit darstellt [Lohmann, 1979]. Zur Bewältigung von schulischen und beruflichen Anforderungen hat die Mentale Rotation eine große Bedeutung [Souvignier, 2000, Hegarty, M. & Waller, D., 2005]. Es stellte sich sogar heraus, dass die Fähigkeit zur Mentalen Rotation Einfluss auf die Wahl der weiterführenden Schule bei deutschen Schulkindern nach der vierten Grundschulklasse hat.

In einer der ersten Studie von Shepard und Metzler [Shepard und Metzler, 1971] mussten die Probanden so schnell und so fehlerfrei wie möglich entscheiden, ob zwei im Raum gedrehte Würfelfiguren identisch sind oder die eine gegenüber der anderen gespiegelt ist. Bei meiner

Studie wählte ich eine ähnliche Aufgabenstellung zur Mentalen Rotation, allerdings wurden die Würfelfiguren durch Polygone ersetzt. Shepard und Metzler postulierten in ihrer Studie einen linearen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit, mit der die Aufgabe gelöst wurde, und der Winkeldifferenz der beiden angezeigten Objekte.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Kinder ab einem Alter von 4 bis 5 Jahren in der Lage sind mental zu rotieren [Marmor, 1975, Marmor, 1977]. Lohaus, Schuhmann-Hengstler und Kessler untersuchten 1999 die Leistungen der räumlichen Fähigkeiten anhand von über 600 Schulkindern im Alter zwischen 7 und 15 Jahren [Lohaus *et al.*, 1999]. Es zeigte sich in den stattgefundenen Tests zur Mentalen Rotation ein Leistungsanstieg mit zunehmendem Alter. Diese Leistungssteigerung konnte in der Literatur mannigfach nachgewiesen werden [Marmor, 1975, Kucian *et al.*, 2007]. Kucian konnte 2007 neben dem positiven Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Aufgabenbewältigung und dem Alter noch die Fehler mit in Korrelation bringen [Kucian *et al.*, 2007]. Er stellte fest, dass je älter die Probanden waren, desto weniger Fehler bei der Aufgabenlösung traten auf.

### **2.1.3 Aufgaben zur Mentalen Rotation - Analytische oder holistische Bearbeitung?**

Die Herangehensweise der Probanden an eine Aufgabe der Mentalen Rotation birgt Stoff für Diskussionen. Cooper und Shepard postulierten 1982, dass die Probanden das zu rotierende Objekt als isomorphes Abbild mental repräsentieren und die Drehung auch mental, vergleichbar mit einer motorischen Drehung, stattfindet [Cooper, L.A., Shepard, R.N., 1982]. Diese Vorgehensweise entspricht einer holistischen Verarbeitung der Mentalen Rotation. Just und Carpenters waren in einer Blickbewegungsstudie von 1976 zu dem Schluss gekommen, dass Aufgaben zur Mentalen Rotation eher einem analytischen Prozess entsprechen [Just, M. A. & Carpenter, P. A., 1976]. Sie vertreten die Meinung, dass das zu rotierende Objekt zuerst mental in einzelne Stücke geteilt wird und darauf eine Mentale Repräsentation der Einzelstücke stattfindet. In einer weiteren Studie revidierten Just und Carpenters ihre Annahme und erklärten, dass einfachere Reize holistisch und komplexere Reize eher analytisch verarbeitet werden [Just, M. A. & Carpenter, P. A., 1985]. Heil und Jansen-Osmann erweiterten diese These um einen Ortscharakter der Herangehensweise [Heil, M. & Jansen-Osmann, P., 2006]. Mittels EEG stellten sie eine Linkslateralität der Aktivierung im Parietallappen während Aufgaben zur Mentalen Rotation bei jüngeren Kindern fest, die mit steigendem Alter abnahm. Dies deuteten sie als Hinweis auf einen Wechsel von der analytischen zu einer holistischen Strategie der Verarbeitung.

Komplex-räumliche Fähigkeit wird durch die Kommunikation verschiedener Hirnareale ermöglicht. Während der Mentalen Rotation beschäftigt das Gehirn hauptsächlich Areale des Parietal- und des Frontallappens, sowie Areale des Arbeitsgedächtnisses [Kucian *et al.*, 2007, Liesefeld, 2011], auf welche ich im Folgenden genauer eingehen möchte:

#### **2.1.4 Die Rolle des Parietallappen bei der Mentalen Rotation**

Der bilaterale Parietallappen, insbesondere der *Intraparietalsulcus*, hat eine Vielzahl von Aufgaben. Zum einen ist er beim Lösen arithmetischer Fragestellungen involviert. Er vermittelt die numerische Größenverarbeitung [Bugden *et al.*, 2012] und die semantische Zahlenverarbeitung, Größenrepräsentation und –manipulation [Dehaene, 1992, Dehaene *et al.*, 1999, Dehaene *et al.*, 2004, Pinel *et al.*, 2001]. Bei letzterem ist insbesondere der horizontale *Intraparietalsulcus* beteiligt.

Zum anderen spielt der Parietallappen auch eine große Rolle für visuell-räumliche Fähigkeiten. Er ist Hauptakteur bei der Erfassung visuell räumlicher Objektinformationen, wie der Orientierung im Raum, der Oberflächen- und Musterausrichtung oder der Objektmanipulation [Shikata *et al.*, 2001]. Des Weiteren bildet er eine Verbindungsstelle für die von ihm erbrachten räumlichen Informationen mit dem sensomotorischen Kortex. So konnte eine Aktivierung des Parietallappens auch bei der Verarbeitung von multimodalen Bewegungsreizen, wie zum Beispiel bei Greif- und Zeigebewegungen, aufgezeigt werden [Bremmer *et al.*, 2001].

Mit Hilfe bildgebender Verfahren, wie zum Beispiel der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) oder der Positronen-Emission-Tomographie (PET), konnte bei Erwachsenen die Beteiligung des Parietallappens an Aufgaben zur Mentalen Rotation nachgewiesen werden [Alivisatos und Petrides, 1997, Carpenter *et al.*, 1999, Harris *et al.*, 2000, Jordan *et al.*, 2002, Kosslyn *et al.*, 1998, Richter *et al.*, 1997, Richter *et al.*, 2000, Tagaris *et al.*, 1996, Thomsen *et al.*, 2000, Weiss *et al.*, 2003, Zacks, 2008]. Verweisend auf Zacks Metaanalyse von 2008 konnte das Zentrum für rotationsspezifische Aktivität im *Intraparietalsulcus* gefunden werden [Zacks, 2008].

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass je größer die Winkeldisparität bei den zu vergleichenden Objekten in der mentalen Rotationsaufgabe ist, desto höher ist die Aktivität in den parietalen Regionen [Tagaris *et al.*, 1997, Carpenter *et al.*, 1999, Zacks, 2008]. Die Mehrzahl der Studien spricht dabei von einer bilateralen Beteiligung des Parietallappens, wobei auch die Meinung vertreten wird, dass nur der rechte *Intraparietalsulcus* für Mentale

Rotation zuständig ist [Harris *et al.*, 2000, Harris und Miniussi, 2003]. Gegenmeinung bezüglich der reinen Aktivität des rechten *IPS* bei Mentaler Rotation bringen Alivisatos, Petrides, Vingerhoets und Santes auf und sehen eine reine Aktivität des linken *IPS* bei solchen Aufgaben als erwiesen [Alivisatos und Petrides, 1997, Vingerhoets *et al.*, 2001].

Studien zur Mentalen Rotation bei Kindern und Jugendlichen zeigten in den gleichen Arealen Aktivierung, jedoch nicht mit der gleichen Aktivitätsverteilung [Booth *et al.*, 1999, Booth *et al.*, 2000]. Booth stellte 1999 heraus, dass in seiner Studie Kinder im Alter von 9 bis 12 Jahren rechtsseitig mehr den inferioren Parietallappen und linksseitig mehr den superioren Parietallappen nutzen [Booth *et al.*, 1999]. Dieses Verteilungsmuster konnte er bei Erwachsenen nicht nachweisen. Beim Vergleich der Aktivitätsverteilung zwischen Erwachsenen und Kindern, kam Kucian zu der Feststellung, dass Erwachsene mehr Aktivität in den parietalen Arealen, insbesondere dem linken *Intraparietalsulcus* zeigten [Kucian *et al.*, 2007]. Weiter konnte Kucian zeigen, dass die Aktivität im linken *IPS* mit steigenden Verarbeitungszeiten bei den Aufgaben zur Mentalen Rotation abnimmt [Kucian *et al.*, 2007]. Diese Erkenntnisse lies Kucian abschließend folgern, dass die mit zunehmendem Alter auch zunehmende Aktivität des linken *IPS* und die vermehrte Verlagerung der Aktivitätszonen von eher diffuser Aktivierung frontal zu eher fokaler Aktivierung parietal entscheidende Entwicklungsprozesse widerspiegelt.

Ähnliche Muster zeigen sich auch beim frontoparietalen Shift, welcher aus der Forschung zur Entwicklung der Zahlenverarbeitung bekannt ist. Der frontoparietale Shift besagt, dass Kindern zunächst mehr frontale Areale zur Zahlenverarbeitung nutzen. Mit zunehmendem Alter und Reife wandert diese Arealaktivität nach parietal [Rivera *et al.*, 2005].

### **2.1.5 Der Frontallappen als Repräsentant der Motorik bei Mentaler Rotation**

Areale des prämotorischen und motorischen Kortex sind ebenfalls in die Durchführung der Mentalen Rotation involviert. Diese Areale haben unter anderem die Aufgabe der Planung und der Ausführung motorischer Aktionen [PicardStrick PL, 2001, Liesefeld, 2011], wobei bei Planungsprozessen der prämotorische Kortex überwiegt [Gerardin *et al.*, 2000, Liesefeld, 2011]. Dorsale rostrale Anteile des prämotorischen Kortex (pMd) sind insbesondere für die räumliche Aufmerksamkeit und das dazugehörige Arbeitsgedächtnis, sowie die Umwandlung von sensorischen Informationen in motorische Informationen wichtig [Lamm *et al.*, 2007].

Mit Hilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) konnten Parsons *et al.* 1995 bei der Mentalen Rotation von Händen Aktivierung des supplementären Motorkortex und der

superioren prämotorischen Areale feststellen [Parsons *et al.*, 1995]. In den gleichen Arealen konnten auch Kosslyn *et al.* 1998 bei einer Studie zur Mentalen Rotation ähnliche Aktivierungsmuster darstellen [Kosslyn *et al.*, 1998].

Es wird davon ausgegangen, dass Mentale Rotation dem Probanden die Erstellung einer Strategie für eine vorgegebene Anforderung abverlangt, die mental durchgeplant, jedoch nicht motorisch ausgeführt wird. Die Aktivität in diesen Arealen stellt somit eine Simulation der Strategie beziehungsweise die Vorstellung der wirklichen Ausübung der Rotation dar [Kosslyn *et al.*, 1998, Zacks, 2008]. Da sich dies in den gleichen prämotorischen und motorischen Arealen abspielt wie auch die eigentliche motorische Ausführung wurde die Meinung abgeleitet, dass gleichzeitige mentale und motorische Rotation sich gegenseitig behindern. Diese Annahme bestätigten Wexler *et al.* mit ihrer Studie, in der sie Probanden gleichzeitig Aufgaben zur Mentalen Rotation wie auch motorische Rotationsaufgaben bewältigen ließen [Wexler *et al.*, 1998]. Bei Aufgaben, in denen die Probanden das Objekt mental und motorisch in die gleiche Richtung rotieren lassen sollten, zeigte sich eine schnelle Reaktionsgeschwindigkeit. In Fällen, bei denen die Richtung des mental zu rotierenden inkompatibel zu der des motorisch zu rotierenden Objekts war, zeigte sich eine langsamere Verarbeitungszeit.

Ganis *et al.* konnten 2000 die Annahme dieses Effekts dadurch untermauern, dass sie den primären motorischen Kortex durch transkranielle Magnetstimulation störten [Ganis *et al.*, 2000]. Dies hatte zur Folge, dass die Probanden bei der Bewältigung von Aufgaben zur Mentalen Rotation längere Verarbeitungszeiten aufzeigten.

Wohlschläger und Wohlschläger zeigten in einer Studie von 1998, dass sich die Verarbeitungszeit bei einem Experiment, in dem Probanden wahlweise entweder eine vergleichbar motorische oder eine Mentale Rotation vollziehen sollten, anglichen [Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A., 1998]. Weiter noch stiegen die Verarbeitungszeiten sowohl mit steigender Winkeldisparität als auch bei Veränderung der Rotationsachse in der Bildebene gegenüber Veränderungen in der Bildtiefe. 2001 konnte Wohlschläger seine Studie noch verfeinern und zeigte, dass die reine Planung einer motorischen Handlung die Ausführung einer Mentalen Rotation beeinflusst [Wohlschläger, 2001].

Die Interferenz zwischen motorischer Planung und Mentaler Rotation konnte durch zwei Studien auch bei Kindern gezeigt werden [Frick *et al.*, 2005, Funk *et al.*, 2005]. Frick und Funk ließen ebenso gleichzeitig mentale Rotationsaufgaben und motorische Aufgaben (Drehen von einem Glücksrad) ausführen. Gemittelt über alle Altersgruppen waren die Verarbeitungszeiten bei kompatiblen Drehrichtungen kürzer als bei inkompatiblen. Bei allen

Kindern stieg die Verarbeitungszeit mit dem Anstieg der Winkeldisparität an. Ebenso wurde von den Autoren vermutet, dass es den Kindern mit steigendem Alter zunehmend gelingt, mentale von motorischen Prozessen zu entkoppeln.

Mit einer ähnlichen Studie bei Kindern sahen Funk *et al.* die Tatsache als bewiesen an, dass motorische Prozesse bei der Mentalen Rotation beteiligt sind und dies bei Kindern sogar noch ausgeprägter vorhanden ist als bei Erwachsenen [Funk *et al.*, 2005]. Kinder und Erwachsene sollten anhand von Fotografien von Handrücken oder Handinnenflächen entscheiden, ob die abgebildeten Hände zu einer linken oder einer rechten Hand gehören. Dazu mussten die Probanden eine Tastatur, die sie entweder von oben oder von unten drücken konnten, bedienen. Es konnte gezeigt werden, dass die Versuchspersonen schneller waren, wenn die eigene Handstellung bereits kongruent zu der Stellung der mental zu rotierenden Hand war. Dieser Effekt zeigte sich stärker bei Kindern.

### **2.1.6 Das Arbeitsgedächtnis – Voraussetzung für erfolgreiche Mentale Rotation**

Das räumliche Arbeitsgedächtnis ist ein essentieller Grundbaustein für den Vorgang der Mentalen Rotation [Hyun und Luck, 2007, Prime und Jolicoeur, 2010, Liesefeld, 2011]. Ohne ein räumliches Arbeitsgedächtnis könnte zum Beispiel das mental rotierte Objekt nicht mit einem Zielstimulus verglichen werden. Der Vergleich von Studien zur Mentalen Rotation und zum räumlichen Arbeitsgedächtnis zeigte, dass bei beiden Studientypen gleiche kortikale Aktivitätsmuster vorzufinden waren [Jordan *et al.*, 2001, Liesefeld, 2011]. Bei diesen Arealen handelt es sich vornehmlich um den dorsolateralen prämotorischen Kortex, den inferioren Präzentralsulcus, den *IPS* und den transversalen Parietalsulcus [Liesefeld, 2011]. Insbesondere der dorsolaterale prämotorische Kortex und der Präzentralsulcus sind in die Aufbringung räumlicher Aufmerksamkeit und in das räumliche Arbeitsgedächtnis involviert [Silver und Kastner, 2009, Liesefeld, 2011]. Ebenso ist nach einer Studie von Silver und Kastner von 2009 die topographische Organisation des *Intraparietalsulcus* ideal passend für die Repräsentation von räumlichen Informationen [Silver und Kastner, 2009].

## **2.2 Mentale Rotation im Altersgefüge**

Zusammenfassend kann man feststellen, dass bei der Mentalen Rotation der *Intraparietalsulcus* als Kerngebiet der Verarbeitung anzusehen ist. Ebenso sind Areale der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses, welche frontalen Hirnarealen zugeordnet werden, intensiv involviert.

Im Altersgefüge konnten ebenfalls ähnliche Muster aufgezeigt werden. So ist sowohl rotationsspezifisch eine Steigerung der Performanz bei der Bewältigung der Aufgaben mit steigendem Alter festzustellen. Mit steigendem Alter erhöht sich auch die Aktivierbarkeit der parietalen Hirnareale [Skagerlund und Traff, 2014]. Sogar ein makrostruktureller Effekt konnte nachgewiesen werden, bei dem mit steigendem Alter die Nervenbahnen, welche die wichtigsten Hirnareale für diese Art von Anforderung verbinden, eine zunehmende Myelinisierung erfahren.

Auf den Grundlagen dieses Wissens baut meine Studie auf und versucht die Ergebnisse mit einer ausdrucksstarken Fallzahl im Altersgefüge von 8 bis zu 19 Jahren zu untermauern. Des Weiteren sollen die Ergebnisse detaillierte Einblicke in die Reifung der Fähigkeiten zur Mentalen Rotation geben. Aufbauend auf dem Wissen über die Entwicklung fanden eine ergänzende Trainingsstudie und eine detaillierte Studie zu makrostrukturellen Veränderungen in unserer Arbeitsgruppe statt. Wir postulierten durch das Training eine ähnliche jedoch schnellere Entwicklung wie im Altersgefüge feststellen zu können. Wir vermuteten ebenso die Entwicklung, die wir anhand von Aktivitätsverteilungen feststellen konnten, auch durch makrostrukturelle Veränderungen darstellen zu können.

So diene auch die Kooperation unserer Arbeitsgruppe mit der Robert Bosch Gesamtschule in Homburg an der Saar der Berücksichtigung pädagogischer Aspekte und Ziele. Aus dieser Kooperation konnte in den Klassenstufen 5 und 6 erfolgreich das Konzept des selbstorganisierten Lernens (SOL) eingeführt werden, welches bereits nach kurzer Zeit einen Leistungsanstieg der Schüler im Vergleich zu den Vorjahren zeigte. Bei dieser Form der Lehre hat der Schüler seinen Lernprozess selbst zu organisieren, eine soziale Lernstruktur zu erschaffen und Verantwortung für das eigene Lernen zu übernehmen.

Zum einen durch den deutlichen Zusammenhang unserer Studien, zum anderen durch die enge Zusammenarbeit innerhalb der Arbeitsgruppe und auch außerhalb mit der pädagogischen Schulpraxis sehe ich die Möglichkeit Rückschlüsse ziehen zu können wie man Kinder bzw. Jugendliche in diesem Alterssegment fördern kann.

## **2.3 Hypothesen**

### **2.3.1 Hypothese 1: Altersabhängigkeit des *Intraparietalsulcus* (IPS)**

Bereits mannigfach wurde in Studien die Aktivierbarkeit des *Intraparietalsulcus* durch Aufgaben der Mentalen Rotation bei Kindern und bei Erwachsenen in unterschiedlichem Maße aufgezeigt. Basierend auf diesen Erkenntnissen nehme ich an, dass die Aktivierbarkeit des *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation einer stetig steigenden Dynamik im Laufe der Entwicklung vom Kind zum Erwachsenen unterliegt.

### **2.3.2 Hypothese 2: Beziehung zwischen *IPS*-Aktivität und Zahlenverarbeitung**

Ausgehend von früheren Befunden zur Überlappung zwischen räumlichen und numerischen Anforderungen erwarte ich eine Abhängigkeit der numerischen Fertigkeiten von dem individuellen Vermögen zur Mentalen Rotation.



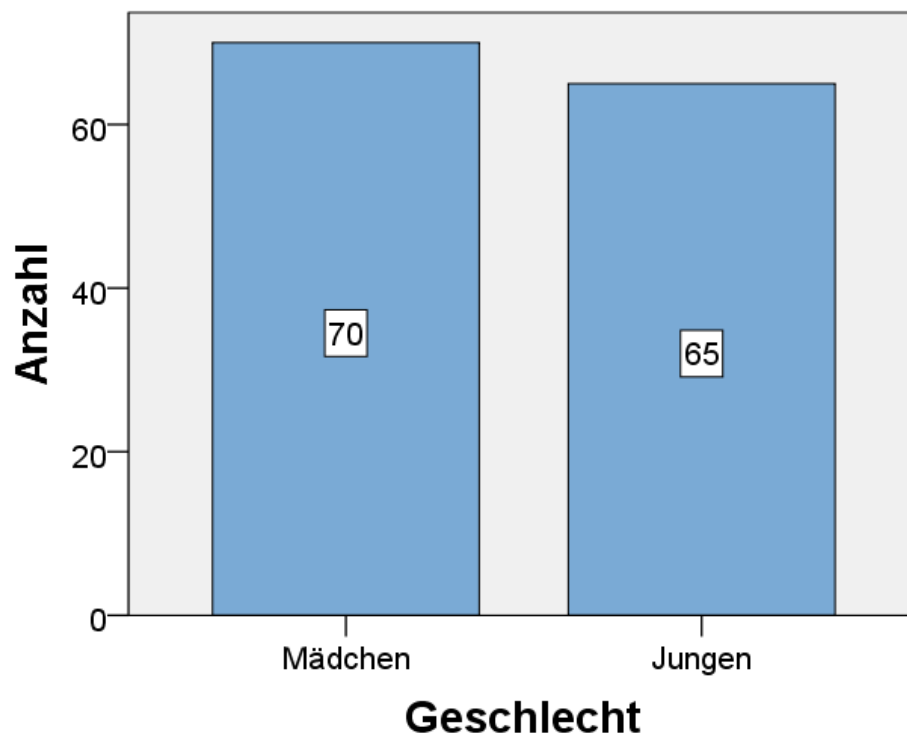
### **3 Material und Methode**

#### **3.1 Probandenakquirierung**

Anlässlich dieser Studie untersuchte ich 140 Kinder und Jugendliche im Alter von 8 bis 19 Jahren. Um diese Probanden für die wissenschaftliche Arbeit zu begeistern, besuchte meine Arbeitsgruppe, unter der Leitung von Dr. rer. med. Christoph Krick, und ich mehrere Real-, Gesamtschulen und Gymnasien im Umkreis. Nachdem ich die Kontaktdaten der Kinder gesammelt hatte, kontaktierte ich die Probanden und ihre Erziehungsberechtigten zum weiteren Informationsaustausch. Nach einer ausführlichen Aufklärung über das Procedere der Studie, die Risiken der Kernspintomographie und der Beantwortung aller übrigen Fragen erhielt ich von den Erziehungsberechtigten jedes Probanden, wenn bereits volljährig von dem Probanden selbst, die notwendige schriftliche Teilnahmeberechtigung. Die Studie war zuvor von der Ethikkommission und den Ministerien für Bildung und Kultur des Saarlandes und in Rheinland-Pfalz positiv beschieden worden.

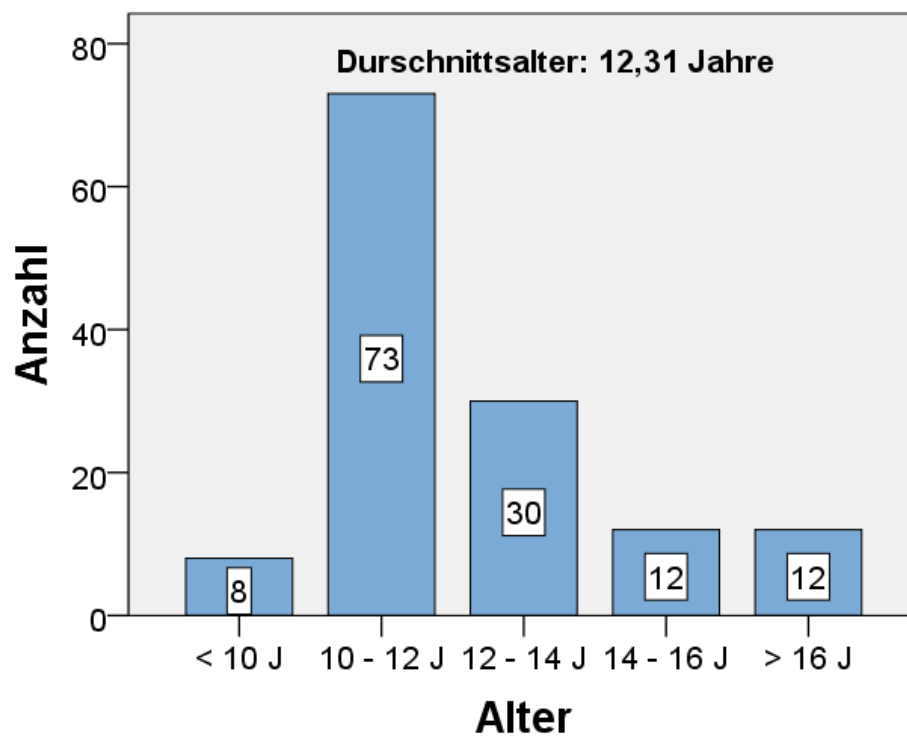
#### **3.2 Probandenstruktur**

Von den 140 Probanden konnten nicht alle durchgeführten Messungen verwertet werden. Die Messdaten eines männlichen Jugendlichen konnten aufgrund zu großer Metallartefakte durch die festeinliegende Zahnsperre nicht genutzt werden. Die Messungen von 4 Probanden waren durch zu große Bewegungsartefakte nicht auswertbar. So ergab sich am Schluss ein auswertbarer Datensatz von 135 gesundheitlich unauffälligen Probanden, wovon 65 männlich und 70 weiblich waren.



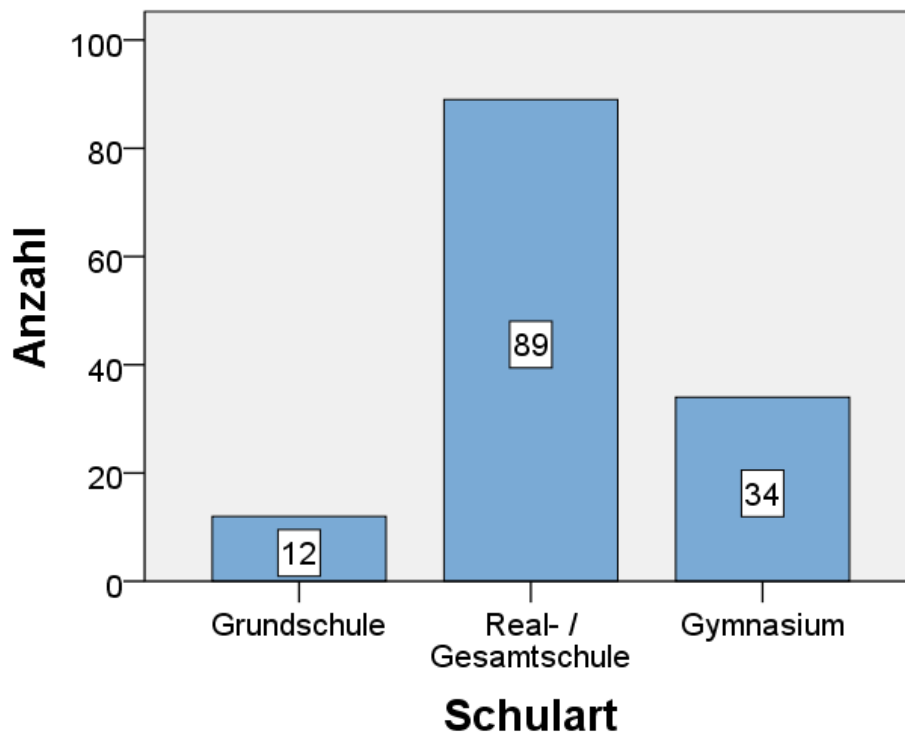
**Abb. 1:** Geschlechterverteilung der Probanden

Die Altersspanne der Probanden reichte von 8 bis 19 Jahren, wobei das durchschnittliche Alter bei 12,31 Jahren lag.



**Abb. 2:** Altersstruktur der Probanden

12 Kinder besuchten zur Zeit der Messung eine Grundschule, 89 eine Real- / Gesamtschule und 34 ein Gymnasium. Die Daten dieser Messungen dienten auch zwei Parallelstudien von Frau Dr. med. Cordula Klewin und Herrn Axel Neuhaus als Grundlage.



**Abb. 3:** Verteilung der Probanden auf Schularten

### 3.3 Tag der Messung

Zu den vereinbarten Terminen erschienen immer eine Gruppe von maximal 5 Probanden mit ihren Erziehungsberechtigten in der Klinik für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie am Universitätsklinikum Homburg. Als erstes mussten die Kandidaten einen Fragebogen (siehe Anhang) ausfüllen, der bereits erbrachte schulische Leistungen und die Selbsteinschätzung im Bezug auf die Leistung abfragte, zum anderen aber auch Aufgaben an die Probanden stellte.

#### 3.3.1 Fragebogen

Zur Gewinnung weiterer Informationen füllten die Probanden einen Fragebogen zum Thema Raum/Zahl/Mathematik aus, welcher im Anhang abgedruckt ist. In dem Fragebogen wurde die damalige Schulnote in dem Fach Mathematik und Deutsch erfragt. Des Weiteren wurden die Probanden dazu angehalten, ihre eigene schulische Leistung und die mit der Schule verbundenen Emotionen anhand von Fragen mit 3-4 Antwortmöglichkeiten einzuschätzen.

Abschließend sollten die Probanden eine Kopfrechenaufgabe, eine Zahnradaufgabe, eine Zahlenstrahlaufgabe und eine Schachtelaufgabe absolvieren.

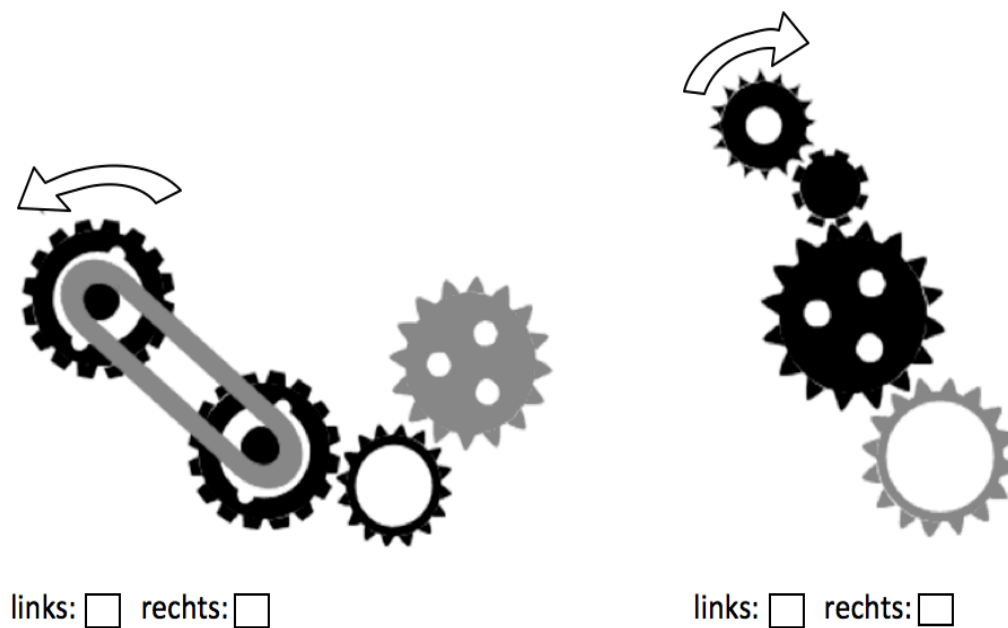
Bei der Kopfrechenaufgabe (siehe Abb. 4) sollten die Probanden Lösung „1“ ankreuzen falls sie die Aufgabe im Kopf lösen würden. Falls sie die Aufgabe schriftlichen lösen würden sollten sie Lösung „2“ ankreuzen. Diese Aufgabe diene uns zur Begutachtung des Umgangs der Probanden mit Zahlen und einer groben Leistungseinschätzung.

$? - 28 = 27$	1	2
$78 - 29 = ?$	1	2
$238 - 146 = ?$	1	2
$300,04 \times 100 = ?$	1	2
$75\text{m} = ?\text{km}$	1	2

**Abb. 4: Kopfrechenaufgabe**

Lösung „1“ ankreuzen, falls Aufgabe im Kopf gelöst werden würde. Bei schriftlicher Aufgabenlösung Lösung „2“ ankreuzen.

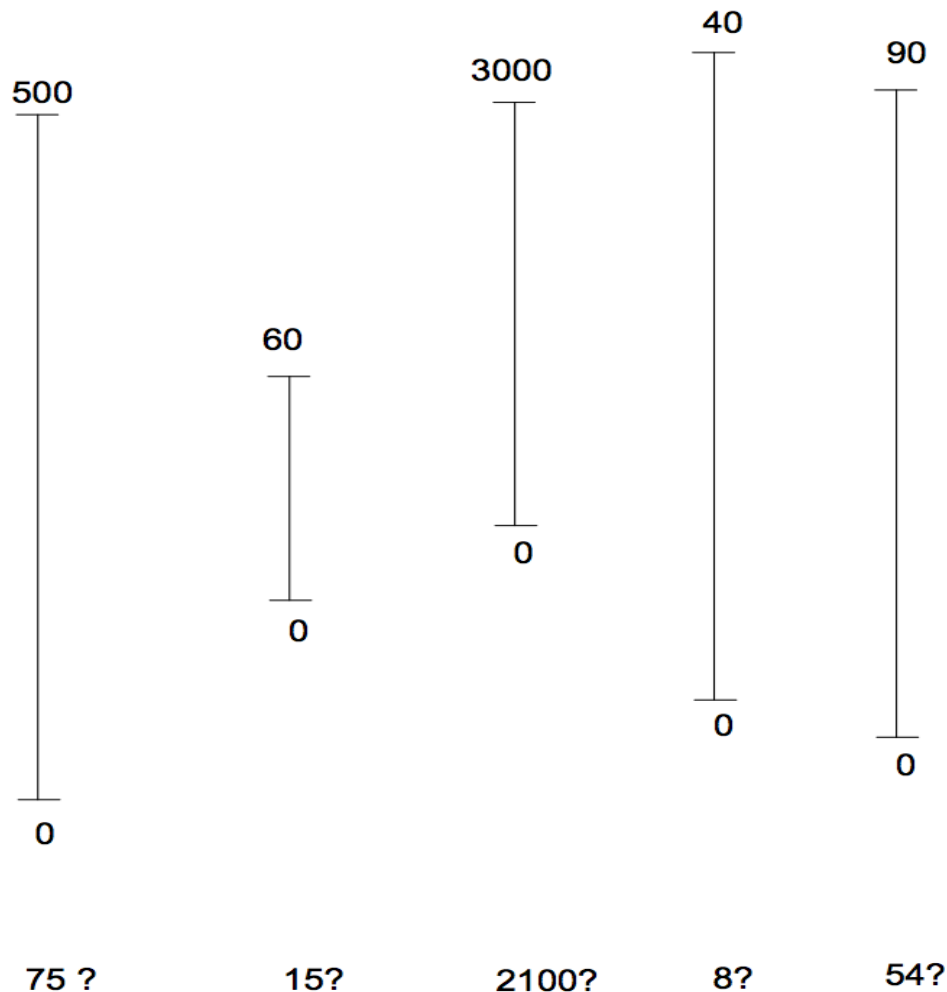
Als nächstes folgte die Zahnradaufgabe (siehe Abb. 5). Dieser Test bestand aus 6 Einzelaufgaben mit 3 Schwierigkeitsstufen. Bei der Zahnradaufgabe hatte der Proband unter Berücksichtigung der Drehrichtung der schwarzen Zahnräder zu entscheiden in welche Richtung das graue Zahnrad dreht. Zur richtigen Lösung dieses Tests wurden dem Probanden logisches Denken und räumliche Vorstellungskraft abverlangt.



**Abb. 5: Zahnrad Aufgabe**

Die Probanden hatten zu entscheiden in welche Richtung sich das graue Rad unter Berücksichtigung der Drehrichtung der schwarzen Räder dreht und sollten die ihrer Meinung nach korrekte Richtung ankreuzen.

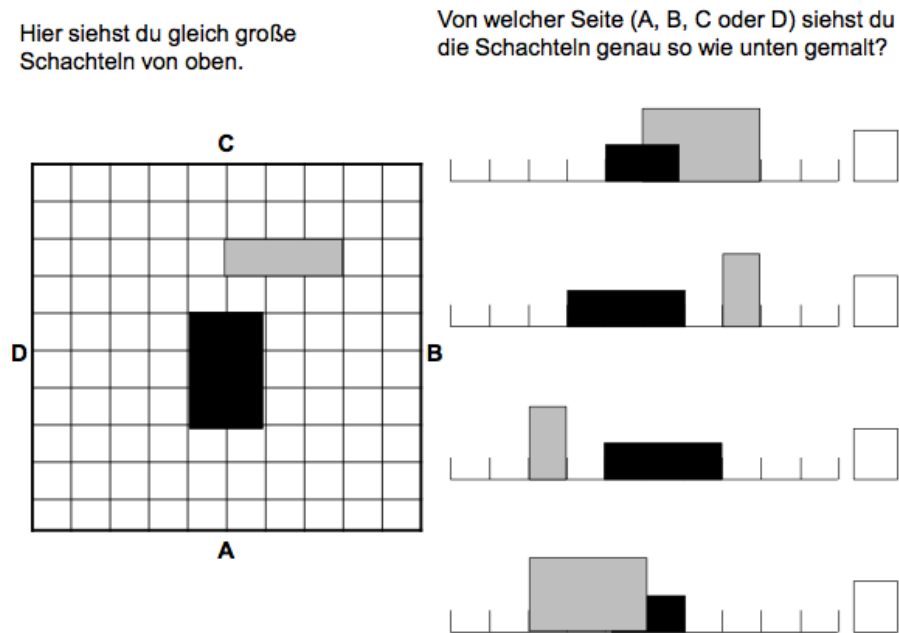
Die dritte Aufgabe war die Zahlenstrahlaufgabe. (siehe Abb. 6). Die Probanden sollten auf 10 verschiedenen Zahlenstrahlen mit unterschiedlicher Skalierung die unter dem Zahlenstrahl geschriebene Zahl der Größe nach auf dem Zahlenstrahl markieren. Die Abweichung der von dem Probanden gesetzten Markierung von der richtigen Lösung maß ich in Millimeter aus. Mit diesem Test sollte die Erfassung einer Zahl auf dem mentalen Zahlenstrahl sowie die räumliche Zuordnung von Zahlen auf dem Zahlenstrahl überprüft werden.



**Abb. 6: Zahlenstrahlaufgabe**

Die Probanden sollten mit einem waagerechten Strich markieren, wo sich die darunter stehende Zahl von der Größe her befinden müsste.

Die letzte Aufgabe, die Schachtelaufgabe (siehe Abb. 7), stellte die höchste Anforderung an das räumliche Vorstellungsvermögen. Diese Aufgabe bestand aus 4 Einzelaufgaben mit steigender Schwierigkeit. Die Probanden hatten bei diesen Aufgaben zu entscheiden, von welcher Seite man auf die links in Vogelperspektive dargestellte Schachtelanordnung schauen muss, um eine Darstellung wie rechts illustriert vorzufinden. Bei genau dieser hier als Beispiel dargestellten Aufgabe wären die richtigen Lösungen von oben nach unten: A, B, D, C. Zusätzlich wurde für diesen Aufgabentyp noch die Zeit der Absolvierung gestoppt, um neben der Richtigkeit der Angaben noch einen Zeitvergleich für die Performanz der Probanden anführen zu können.



**Abb. 7: Schachtelaufgabe**

Die linke Abbildung zeigt die Schachtelanordnung aus der Vogelperspektive. Die rechte Abbildung zeigt die Schachtelanordnung von der Seite. Die Probanden sollten in die vier Kästchen rechts eintragen, welche Ansicht zu welcher Seite passt.

### 3.3.2 Vorbereitung zur Messung

Nachdem die Kandidaten den Fragebogen bearbeitet hatten, wurde ihnen das zu lösenden Paradigma (siehe unten) anhand eines extra außerhalb des MRTs positionierten Computers erklärt. Es fand sich Zeit, dass jeder Proband, bevor die eigentliche Messung losging, selbstständig an dem Computer die Lösung der Paradigma exemplarisch erlernen konnte.

Nach einer erneuten Kontrolle bezüglich aller Kontraindikationen einer MRT Messung demonstrierte ich spielerisch die Funktionsweise des Kernspintomographen, in diesem Fall eines Siemens Magnetom Skyra mit 3 Tesla Feldstärke.

Die Probanden wurden darauf einzeln und direkt am Kernspintomographen mit der Funktionsweise der Fernbedienungen zur Auswahl der richtigen Lösung vertraut gemacht. Zu dieser Auswahl verwendete ich zwei Fernbedienungen, jeweils eine in einer Hand des Probanden. Eine Fernbedienung stand für die Entscheidung „Ja“ und die Fernbedienung in der anderen Hand für die Entscheidung „Nein“. Diese Fernbedienungen waren mittels eines Lichtleiterkabels mit einem außerhalb des Magnetfeldraumes stationierten Rechner

verbunden. Dieser Rechner zeichnete während der MRT Messung die Verarbeitungszeiten, welche der Proband bis zum Drücken eines Knopfes brauchte, und die Richtigkeit des gedrückten Knopfes auf. Diese Informationen fasse ich im Nachfolgenden unter dem Stichwort der „Verhaltensdaten“ zusammen. Der „Ja“- und „Nein“-Knopf wurden zwischen linker und rechter Hand über das Kollektiv ausbalanciert: Nach jeder Messung eines Probanden wurde die Fernbedienung für die Antwort „Ja“ von der einen in die andere Hand getauscht. In einer vorausgehenden Übungssession wurde die entsprechende Zuordnung zu den Händen am Computer erlernt. Durch das Ausbalancieren der Hände zur Bedeutung der Knöpfe konnte auf eine Differenzierung bezüglich der Händigkeit verzichtet werden.

### 3.3.3 Kernspinmessung

Nachdem die Probanden einen Gehörschutz aufgezogen hatten, wurden sie gebeten rücklings auf der Untersuchungsliege Platz zu nehmen. Darauf wurden die Fernbedienungen in ihren Händen und eine Notrufklingel auf ihrem Bauch positioniert. Zur Bilderzeugung nutzte ich eine Standardkopfspule, an welcher ein Spiegel befestigt war. Dieser Spiegel ermöglichte es dem liegenden Probanden auf eine Leinwand zu sehen, wo mittels eines Beamers das zu lösende Paradigma projiziert wurde. Der Ablauf des Paradigmas mit der Folge von Bildprojektionen und dem Aufzeichnen der Verhaltensdaten erfolgte automatisiert über einen PC, der zugleich mit dem MRT synchronisiert war.

Der Kernspintomograph wurde durch uns von außerhalb gesteuert. Der Proband hatte jederzeit die Möglichkeit Kontakt mit uns durch eine Sprechanlage aufzunehmen oder die Messung abubrechen. Des Weiteren informierte ich die Probanden regelmäßig über den bevorstehenden Abschnitt der Messung. Die MRT Messung beinhaltete 4 verschiedene Sequenzen und dauerte insgesamt ca. 23 Minuten. (siehe Abb. 8)

Die erste Sequenz war eine Localizer-Sequenz, welche 60 Sekunden dauerte. Diese Sequenz diente der eindimensionalen, niedrigauflösenden Darstellung des Untersuchungsgebietes und zeigte uns die Lage des Probandenkopfes im Messfeld.

Die darauf folgende Sequenz, die „field inhomogeneity“-Sequenz, dauerte 24 Sekunden und sollte als Vorbereitung für die hochauflösenden Sequenzen die Feldinhomogenitäten innerhalb des Untersuchungsgebietes messen.

Als dritte Sequenz folgte die 15 Minuten und 55 Sekunden andauernde funktionelle BOLD-Sequenz, während derer die Kandidaten aktiv die Paradigma bearbeiten sollten. Diese



Sequenz erzeugte die Rohdaten, aus denen die Aktivität der Hirnareale berechnet werden konnte.

Zu guter Letzt wurde eine T1 gewichtete MP-RAGE-Sequenz (Magnetization prepared rapid acquisition of gradient echo) durchgeführt. Sie dauerte 6 Minuten und 5 Sekunden und lieferte uns hochauflösende, dreidimensionale, anatomische Bilder des Untersuchungsgebietes. Diese Sequenz wurde als anatomisches Korrelat zu der Aktivitätsdarstellung und zur Untersuchung von makrostrukturellen Unterschieden durchgeführt.

<b><u>Sequenz</u></b>	<b><u>Einstellung</u></b>	<b><u>Dauer</u></b>
<b>Localizer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sagittal</li> <li>• TR: 8,6 s</li> </ul>	60 s
<b>Field Inhomogeneity</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koronar</li> <li>• SD: 2 mm</li> <li>• TR: 0,5 s</li> </ul>	24 s
<b>BOLD-Sequenz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echo planar imaging</li> <li>• SD: 3 mm Gap: 3,75 mm</li> <li>• TR: 2,2 s TE: 30 ms</li> <li>• Flip angle: 90 °</li> <li>• Voxelgröße: 2x2x3 mm</li> <li>• 30 Schichten mit 434 Bildern</li> </ul>	15 min 55 s
<b>T1 gewichtete MP-RAGE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sagittal</li> <li>• SD: 0,9 mm</li> <li>• TR: 1,9 s TE: 2,13 ms</li> <li>• Flip angle: 90 °</li> <li>• Voxelgröße: 0,9 mm<sup>3</sup></li> </ul>	6 min. 5 s
<b>Insgesamt</b>		23 min. 24 s

**Abb. 8: MRT-Sequenzen**

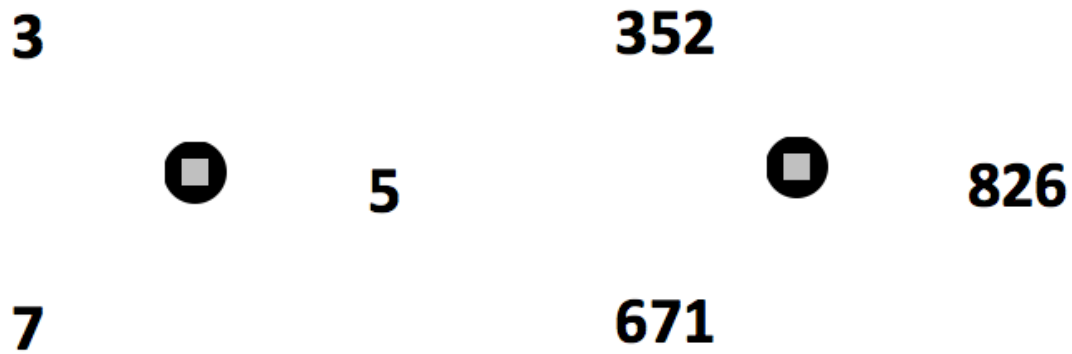
Abkürzungen: TR = Repetition Time; TE = Echo Time; SD = Schichtdicke; Gap = Abstand zwischen den Schichten

Nachdem der Proband die MRT Messung gemeistert hatte, konnte er direkt seine anatomischen Bilder an dem Steuercomputer begutachten und Fragen zu den dargestellten Strukturen stellen. Als Belohnung für die Studienteilnahme erhielt jeder Proband ein T-Shirt mit einem zweidimensionalen Kernspinbild seines Gehirns.

### **3.3.4 Paradigma**

Grundlegend galt es zwei verschiedene Aufgabentypen zu bewältigen. Der eine Aufgabentyp bestand aus einem Zahlenvergleich, der andere aus einer Aufgabe zur Mentalen Rotation. Beide Aufgabentypen wechselten fortwährend ab und erschienen während der BOLD-Sequenz insgesamt 144 mal. Jede Aufgabe wurde für 3 Sekunden eingeblendet. Danach erschien das Fixationsobjekt während eines variablen Intertrial-Intervalls. Das erstmalige Drücken eines Knopfes der Fernbedienung wurde als Lösung der Aufgabe, die gerade angezeigt wurde, registriert. Eine Korrektur wurde nicht zugelassen. Im Fixationsobjekt wurde danach ein Feedback angezeigt: Falls die Aufgabe richtig gelöst wurde, wurde es dem Probanden mit einem grünen Licht angezeigt. Bei Drücken des falschen Knopfes erleuchtete ein rotes Signal. So wurde dem Probanden direkt eine Rückmeldung über die eigene Performanz gegeben. Das Programm, welches die beiden Aufgaben enthielt, wurde von Dr. rer. med. Christoph Krick (Institut für diagnostische und interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikum des Saarlandes) mit LabView geschrieben. Die Verarbeitungszeit von dem Erscheinen der Aufgabe bis zum Betätigen des Knopfes und die Fehleranzahl der Entscheidungen jeder einzelnen Aufgabe wurden digital gespeichert.

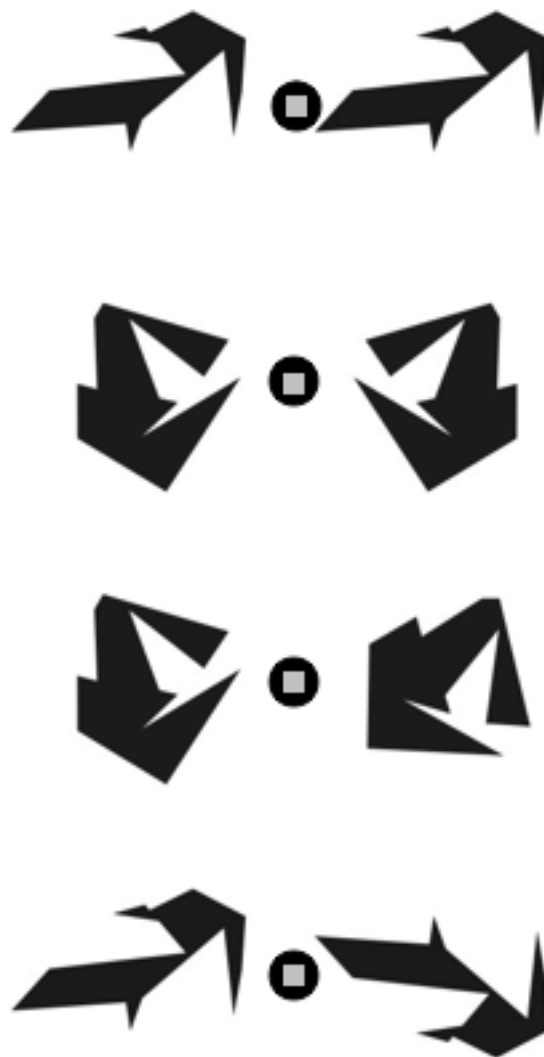
Bei der Zahlenvergleichsaufgabe musste sich der Proband entscheiden, ob eine Zahl, welche auf der rechten Bildseite eingeblendet wurde, von der Größe zwischen zwei Zahlen, welche auf der linken Bildseite eingeblendet wurden, einzuordnen ist. Falls dies möglich war, sollte der Proband den „Ja“ Knopf drücken, falls nicht den „Nein“ Knopf. Diesen Aufgabentyp gab es mit einstelligen, zweistelligen und dreistelligen Zahlen (siehe Abb. 9).



**Abb. 9: Zahlenvergleichsaufgabe**

Zwei Beispiele der Zahlenvergleichsaufgabe, die während der funktionellen MRT Messung stattfand. Der Proband hatte zu entscheiden ob die rechts abgebildete Zahl der Größe nach in das links abgebildete Zahlenintervall passt.

Die Aufgabe zur Mentalen Rotation war durch zwei gleiche Polygone nebeneinander aufgebaut. Es gab die Möglichkeit, dass das rechte Polygon im Bezug zu dem Linken um  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  oder  $120^\circ$  im Uhrzeigersinn gedreht war. Die Aufgabe bestand darin, zu entscheiden, ob das rechte Polygon im Vergleich zum linken Polygon kongruent ist oder spiegelverkehrt. Bei Kongruenz musste der Proband den „Ja“ Knopf drücken, bei Spiegelbilder den „Nein“ Knopf (siehe Abb. 10).



**Abb. 10: Aufgabe zur Mentalen Rotation**

Vier Beispiele (von oben nach unten: kongruent ohne Rotation, spiegelverkehrt ohne Rotation, kongruent mit 60° Rotation, spiegelverkehrt mit 120° Rotation) der Aufgabe zur Mentalen Rotation während der funktionellen MRT Messung. Der Proband hatte zu entscheiden ob das rechte Polygon kongruent zu dem Linken ist.

### 3.4 Auswertung der Verhaltens- und Fragebogendaten

Die Informationen aus dem Fragebogen und aus den experimentellen Verhaltensdaten, welche die Verarbeitungszeiten und die Fehlerzahlen der Probanden für jede einzelne Aufgabe während der funktionellen MRT Messung beinhalteten, wurden in eine Datenbank übertragen. Zur statistischen Analyse dieser Datenbank benutzte ich das Programm „IBM SPSS Statistics 20“.

### **3.5 Auswertung der Bilddaten**

Im weiteren Verlauf wurden die erhobenen Daten von mir mittels der auf MATLAB basierenden Software Statistical Parametric Mapping 8 (SPM; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) ausgewertet. Der primäre Schritt der Auswertung betrifft die sogenannte Vorverarbeitung, welche Vorbereitungsarbeiten zur statistischen Auswertung der Daten darstellt, und ist in den folgenden Abschnitten erläutert:

#### **3.5.1 Slice Time Korrektur**

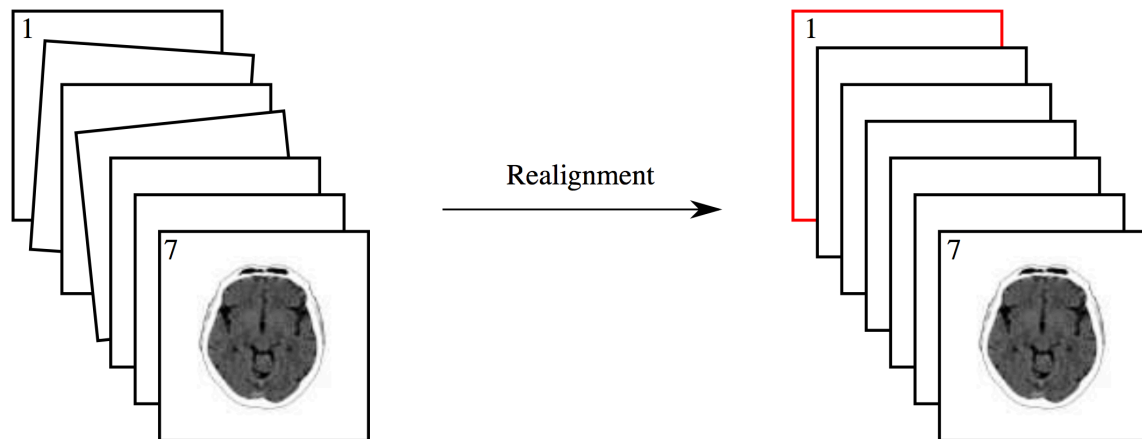
Bei der fMRT Messung wird ein Volumenbild aus mehreren Schichten zusammengesetzt und jede Schicht nacheinander zu einem anderen Zeitpunkt gemessen. Diese zeitliche Differenz muss bei einer fMRT Analyse, bei der eine möglichst hohe zeitliche Auflösung gefordert ist, berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird als erster Schritt der Auswertung die Phasenkodierung (Slice Timing) durchgeführt. In diesem Schritt wählt man sich einen Zeitpunkt aus an dem die Region, welche im Interesse der Untersuchung liegt, gemessen wird. Die Schichten die vor und nach der Region des größten Interesses gemessen wurden werden daraufhin auf den gewünschten Zeitpunkt interpoliert, sodass bei der statistischen Analyse davon ausgegangen werden kann, dass alle Schichten zum gleichen Zeitpunkt gemessen wurden.

#### **3.5.2 Realignment**

Die Probanden wurden im Vorfeld über die Problematik der Bewegungsartefakte aufgeklärt und gebeten so ruhig wie möglich während der Messung liegen zu bleiben. Allerdings sind Bewegungsartefakte bei einer Messdauer von über 20 Minuten sowie physiologische Bewegungen wie Atmung und Herzschlag nicht zu vermeiden.

Durch die Bewegung wird das Gehirn während der Untersuchung verschoben und verdreht abgebildet und somit das von ein und demselben Ort im Gehirn stammende Signal an unterschiedlichen Zeitpunkten in unterschiedlichen Voxel abgebildet werden.

Aus diesem Grund folgte als zweiter Bearbeitungsschritt der funktionellen Bilddaten die Bewegungskorrektur (Realignment). Bei dieser Korrektur wird jedes Einzelbild nach dem ersten Einzelbild der Serie ausgerichtet, indem es um die drei Raumachsen gedreht und in den drei Raumebenen verschoben wird.



**Abb. 11: Vorverarbeitung: Darstellung des Realignment**

Abbildung von <http://www.fmri-easy.de/> nach C. Siedentopf.

Allerdings kann diese Korrektur nur kleine Bewegungsartefakte bereinigen. Sobald sich ein Proband zu sehr bewegte, konnten seine funktionellen MRT Bilder für die statistische Analyse nicht berücksichtigt werden.

### 3.5.3 Koregistrierung

Die Koregistrierung beschreibt die anatomische Angleichung der Volumenaufnahmen des Probanden mit den fMRI bzw. den hochauflösenden anatomischen Messdaten. Dadurch kann die Normalisierung besser durchgeführt werden und die Aktivierungen besser anatomischen Strukturen zugeordnet werden.

### 3.5.4 Normalisierung (Normalize)

Die Gehirne der einzelnen Probanden unterscheiden sich sowohl in Form als auch in Größe. Um Aktivierungen der einzelnen Probanden untereinander vergleichen zu können ist eine Normalisierung der Gehirne zwingend notwendig. Bei der Normalisierung werden durch systematische Verzerrung des Ausgangsdatensatzes korrespondierende anatomische Strukturen der Probandengehirne mit denen eines Standardgehirns in Deckung gebracht, wodurch die gleichen anatomischen Strukturen immer an denselben Koordinaten liegen. Damit ist ein Vergleich innerhalb und zwischen Gruppen möglich.

### **3.5.5 Glätten (Smoothing)**

Mit Hilfe des räumlichen Glättens werden Signalsprünge zwischen benachbarten Voxel beseitigt. Dies verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis und zufällige Effekte, die ein Voxel betreffen, werden durch Verrechnung mit dem Nachbarvoxel herausgemittelt. Dies hat eine bessere Abgrenzbarkeit von Aktivierungen zu Störsignalen und damit eine bessere Validität der statistischen Analyse zur Folge. Des Weiteren bietet das Glätten eine Verbesserung der Vergleichbarkeit der Bilddaten der verschiedenen Probanden. Es wurde ein 8 mm breiter Gauß'scher Glättungsalgorithmus verwendet.

### **3.5.6 Modell Schätzung und Statistik**

Nachdem die Vorverarbeitung nach den oben genannten Schritten abgeschlossen war, folgte die Erstellung eines statistischen Modells. Zuerst wurde ein statistisches Modell für jeden einzelnen Kopf angelegt. Dabei wurde die Analyse verschiedener funktioneller Kontraste durchgeführt (siehe Tab. 12).

Anhand dieser Kontraste berechnete SPM die Verteilung der Aktivierung der Hirnareale und ermöglichte somit letztendlich die Darstellung der Aktivierungen bei jedem einzelnen Probanden auf einem standardisierten Gehirnmodell.

Zur Verrechnung der Aktivierungen aller Probanden untereinander wurden die Einzelkopfstatistiken zu einer Gruppenstatistik zusammengefasst. Dazu wurden die Kontraste aus der Einzelkopfstatistik in statistischen Tests zugrunde gelegt. Besonders bedeutungsvoll für diese Arbeit war dabei die Möglichkeit der Regressionsanalyse, um das Probandenalter mit der Gehirnaktivierung in Zusammenhang zu bringen.

Aus den Ergebnissen der statistischen Tests konnte die Effektstärke des Aktivierungsniveaus verschiedener Areale für jeden einzelnen Probanden extrahiert werden. Diese Werte entsprachen der individuellen Aktivität der Probanden in einem bestimmten Hirnareal. Auch diese Parameter wurden in die SPSS Datenbank importiert. Somit konnte ich Korrelationen der Hirnaktivierung bestimmter Areale mit Faktoren aus den Verhaltensdaten auch post hoc errechnen.

**Tab. 12: Übersicht der angewandten Kontraste zur Erstellung eines statistischen Modells**

<b>Nr.</b>	<b>Kontrastname</b>	<b>Darstellung der Aktivität (durch)</b>
<b>1</b>	Polygon000	Unrotierte Polygone
<b>2</b>	Polygon060	60° rotierte Polygone
<b>3</b>	Polygon120	120° rotierte Polygone
<b>4</b>	Zahlen009	Einstellige Zahlen
<b>5</b>	Zahlen099	Zweistellige Zahlen
<b>6</b>	Zahlen999	Dreistellige Zahlen
<b>7</b>	Rotation60	Mehraktivität von 60° rotierten zu unrotierten Polygonen
<b>8</b>	Rotation120	Mehraktivität von 120° rotierten zu unrotierten Polygonen
<b>9</b>	Zahl009-Form	Mehraktivität einstelliger Zahlen zu unrotierten Polygonen
<b>10</b>	Zahl099-Form	Mehraktivität zweistelliger Zahlen zu unrotierten Polygonen
<b>11</b>	Zahl999-Form	Mehraktivität dreistelliger Zahlen zu unrotierten Polygonen
<b>12</b>	Zahlengröße099	Mehraktivität von zweistelligen zu einstelligen Zahlen
<b>13</b>	Zahlengröße999	Mehraktivität von dreistelligen zu einstelligen Zahlen
<b>14</b>	Z099 > Z009 + Z999	Mehraktivität von zweistelligen zu der Summe von ein- und dreistelligen Zahlen
<b>15</b>	(Z099-Z009) - (P060-P000)	Mehraktivität von zweistelligen zu einstelligen Zahlen gegenüber der Mehraktivität von 60° zu unrotierten Polygonen



### 3.5.7 Anatomische Zuordnung der Aktivierungsareale

Zur Visualisierung der anatomischen Lage von Aktivierungsmaxima im Gehirn konnten verschiedene Projektionsbilder über die Software SPM realisiert werden:

- Schnittbild-Projektionen zeigten eine Aktivierung in ihrer Position anhand von drei Schnittbildebene in axialer, sagittaler und coronarer Ausrichtung („Sectionsbild“).
- Die Überlagerung mehrerer oberflächennaher Aktivierungen konnte über eine Darstellung mittels „Oberflächenrendering“ der Gehirnlandkarte realisiert werden („Renderbild“).

In allen Fällen wurden die Aktivierungen anhand des statistischen T-Werts über eine Fehlfarbandarstellung visualisiert, die optisch von den Grauwerten der Gehirnkarte hervortrat. Die hirnanatomische Zuordnung der Aktivierungsmaxima wurde mit der SPM Anatomy Toolbox (Research Center Jülich, Deutschland) [Eickhoff *et al.*, 2005, Eickhoff *et al.*, 2007] sowie des Vergleichs der resultierenden MNI bzw. Talairach Koordinaten mit anatomischen Atlanten bestimmt. Des Weiteren nutzte ich zur genauen Bestimmung von Hirnarealen Masken des anatomischen Atlas „Pickatlas“ (ANSIR Laboratory, Winston Salem, USA).

## 4 Ergebnisse

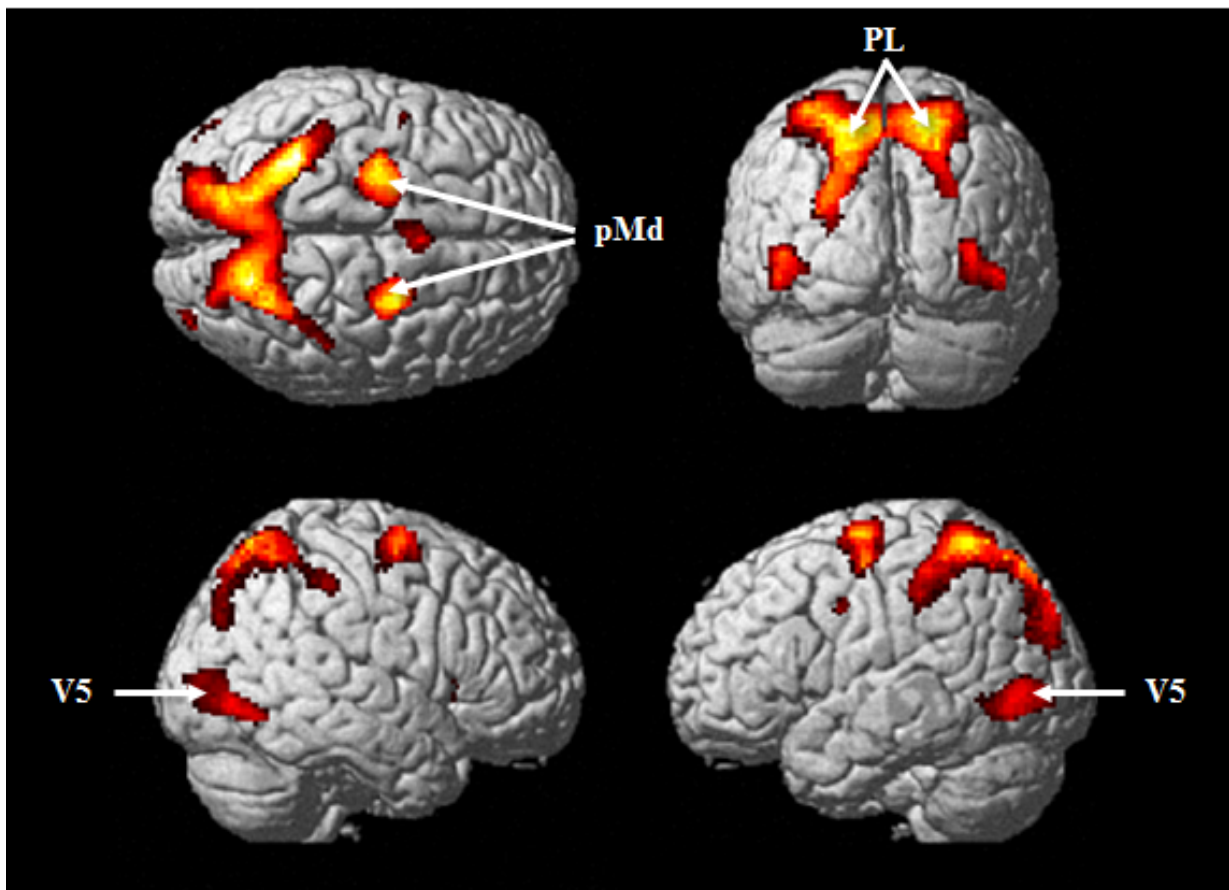
### 4.1 Ergebnisse der funktionellen MRT Daten

#### 4.1.1 Das Verarbeitungszentrum der Mentalen Rotation

Wie auch schon in einer durch Dr. rer. med Christoph Krick und Sonja Kreis [Krick *et al.*, 2013] durchgeführten Vorstudie konnte ich, in jedoch höherer Fallzahl ( $n = 135$ ), das Maximum der Aktivierung bei Aufgaben der Mentalen Rotation beidseits im Bereich des *Intraparietalsulcus* aufzeigen.

Dazu nutzte ich den Kontrast „Rotation60“, welcher die Mehraktivität von 60° rotierten zu nicht rotierten Polygonen zeigt. Dieser Kontrast wurde unkorrigiert mit einem Signifikanzniveau auf Voxel Ebene von  $p < 0,001$  und einem extent threshold von 20 Voxel zur Erstellung der Aktivierungskarten verwendet. Es flossen die Daten der 135 Probanden in die Gruppenstatistik ein.

Die Renderdarstellung des Kontrasts zeigte, dass die Maxima der Aktivierung beidseitig in der Parietalregion zu finden sind. Darüberhinaus konnten auch Signale im dorsalen prämotorischen Kortex (pMd) und in einem Teil des visuellen Kortex (V5) aufgezeichnet werden (siehe Abb. 13). Die anatomische Zuordnung der Regionen wurde mit Hilfe der „SPM Anatomy Toolbox“ vorgenommen [Geyer, 2004, Malikovic *et al.*, 2007, Scheperjans *et al.*, 2008].



**Abb. 13: Renderdarstellung Kontrast „Rotation60“**

Aktivierungsmaxima beidseits in der Parietalregion (PL) bei Aufgaben zur Mentalen Rotation. Weitere Aktivierungszentren: Visueller Kortex (V5) beidseits und dorsaler prämotorischer Kortex (pMd) beidseits. Renderdarstellung Kontrast „Rotation60“ unkorrigiert; Signifikanzniveau auf Voxel Ebene:  $p < 0,001$ ; extent threshold: 20 Voxel.

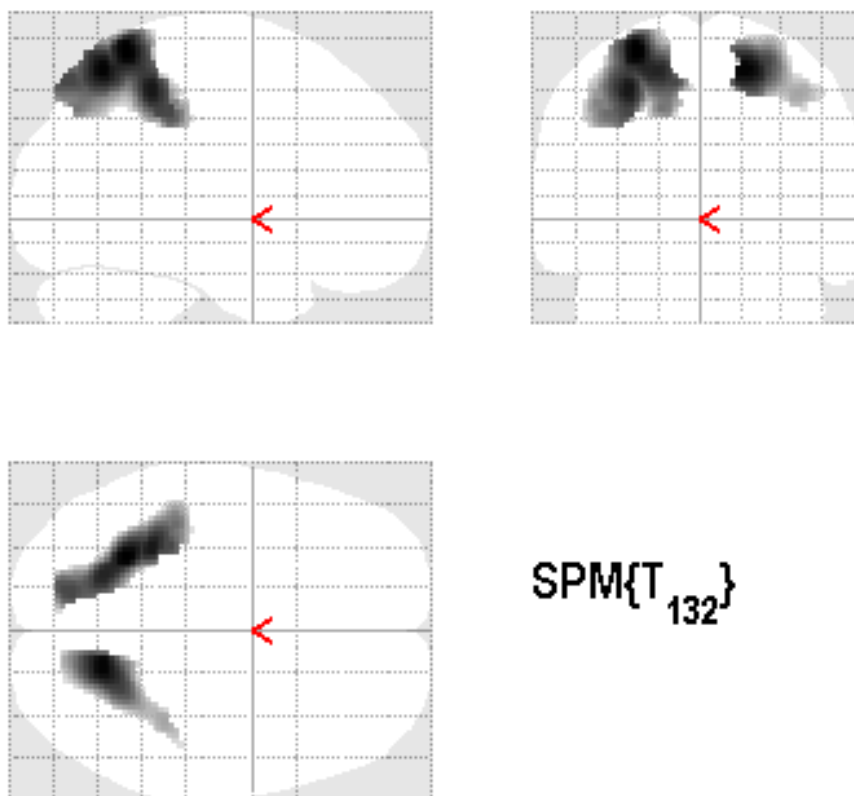
Die statistische Analyse zu der Renderdarstellung von Kontrast „Rotation60“ ermöglicht eine differenziertere Betrachtung. In der Analyse sind die Cluster der stärksten Aktivierung mit den entsprechenden Koordinaten, den korrigierten Z-Werten und dem FWE-korrigierten Signifikanzniveau des Clusters vermerkt (siehe Tab. 14). Der korrigierte Z-Wert beschreibt die Effektstärke innerhalb des Clusters. Das Signifikanzniveau des Clusters ist FWE-korrigiert und liegt für die Parietalregion und für beide Seiten des dorsalen prämotorischen Kortex bei  $p < 0,001$ . Für die Cluster des visuellen Kortex liegt das FWE-korrigierte Signifikanzniveau bei  $p < 0,05$ .

**Tab. 14: Statistische Analyse des Kontrast „Rotation60“**

Region	MNI Koordinaten des Clusterzentrums [mm] (x y z)			korrigierter Z-Wert	$p_{\text{FWE kor.}}$ des Clusters
Parietallappen, beidseits	-28	-54	+66	6,66	>0,001
Dorsaler prämotorischer Kortex, links	-24	-12	+56	6,83	>0,001
Dorsaler prämotorischer Kortex, rechts	+26	-6	+56	5,97	>0,001
Visueller Kortex V5, links	-44	-80	-2	5,05	0,023
Visueller Kortex V5, rechts	+42	+74	-4	4,20	0,010

Die Tabelle zeigt die Cluster der Aktivierung bei Kontrast „Rotation60“ mit den entsprechenden Koordinaten, den korrigierten Z-Werten und dem FWE-korrigierten Signifikanzniveau des Clusters. Der korrigierte Z-Wert gibt die Effektstärke innerhalb des Clusters an. Das Signifikanzniveau ist für die Cluster des visuellen Kortex bei  $p < 0,05$  und bei den Cluster der Parietalregion und des dorsalen prämotorischen Kortex bei  $p < 0,001$ .

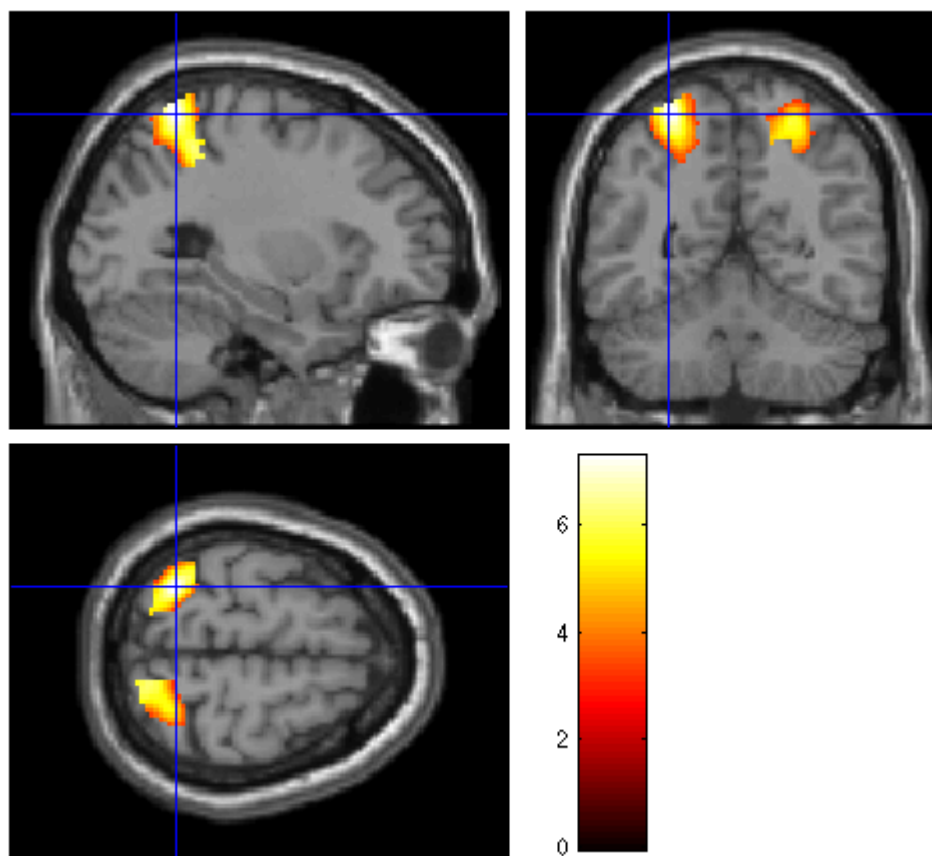
Um im Folgenden den Fokus auf die Parietalregion zu legen, erstellte ich mit Hilfe des „Pickatlas“ eine Maske, durch welche lediglich die Aktivierungen in der Parietalregion berücksichtigt werden (siehe Abb. 15).

**Abb. 15: Kontrast „Rotation60“ mit Maske zur Parietalregion überlagert**

Darstellung der Aktivierung bei dem Kontrast „Rotation60“ mit einer zur Parietalregion erstellten Maske überlagert.

Die Darstellung eines Renderbilds lässt lediglich Rückschlüsse auf den Ort der Aktivierung mittels einer Betrachtung der Oberflächenstrukturen zu. Bei der Renderdarstellung können sich die Aktivierungen allerdings auch ungesehen unterhalb der Großhirnrinde abspielen. Zur Betrachtung der Aktivierung unterhalb der Großhirnoberfläche bedient man sich einer Schnittebenen-Darstellung. Mit Hilfe dieser Darstellung konnte ich das Aktivierungsmaximum bei Aufgaben zur Mentalen Rotation noch genauer lokalisieren.

Die Schnittebenen-Darstellung von Kontrast „Rotation60“ unter Einbeziehung der Maske zur Parietalregion zeigt das Maximum der Aktivierung zwischen dem *superioren* und *inferioren* Parietallappen, nämlich dem *Intraparietalsulcus*. Dabei überwiegt die Aktivierung der linken Seite minimal der Aktivierung der rechten Seite (siehe Abb. 16).



**Abb. 16: Schnittebenen-Darstellung Kontrast „Rotation60“ mit Parietalregionmaske**

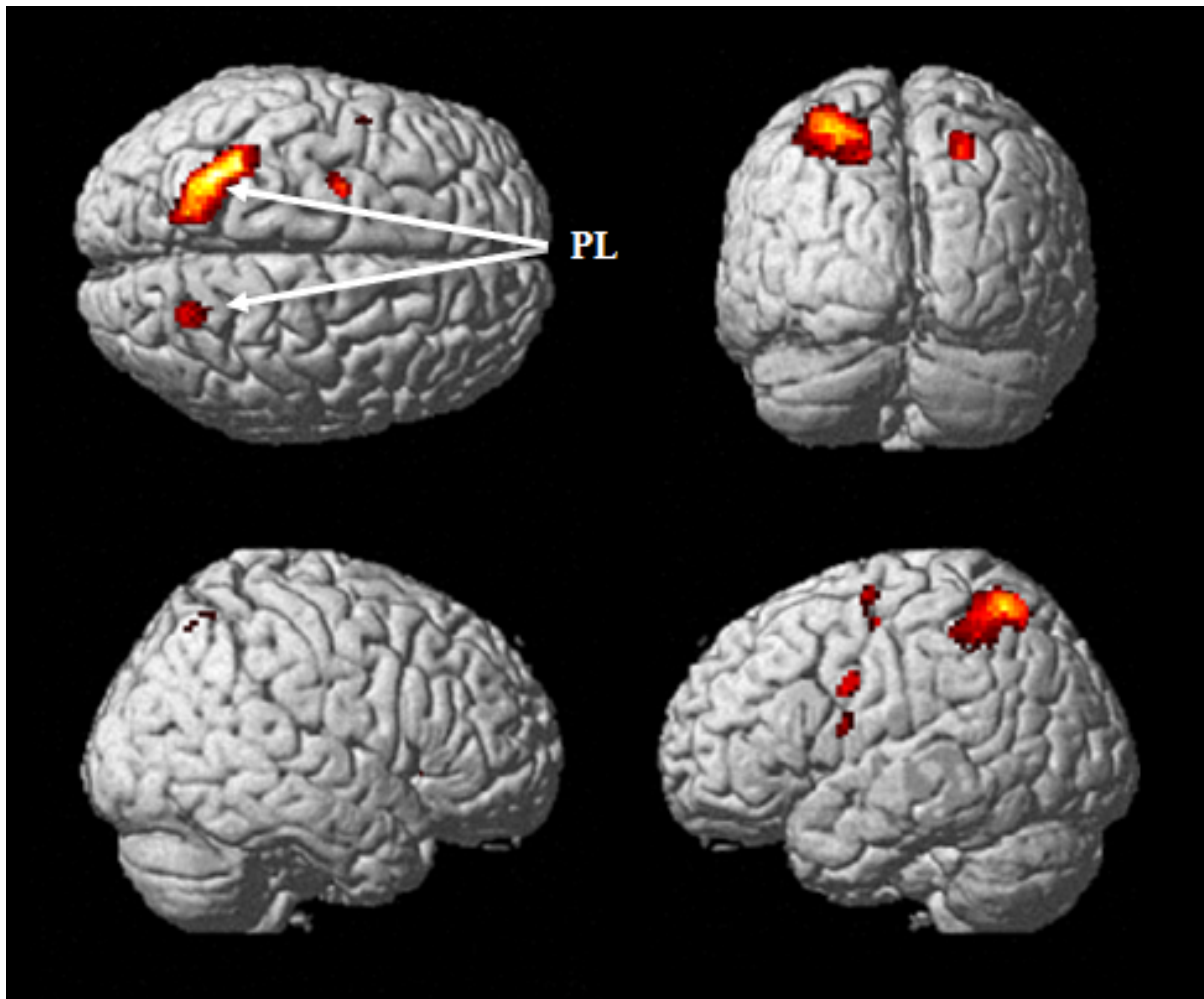
Diese Schnittebenen-Darstellung konkretisiert die Lage des Aktivierungsmaximums bei Kontrast „Rotation60“. Das Maximum ist mittels des Fadenkreuzes markiert und liegt zwischen dem *superioren* und *inferioren* Parietallappen, dem *Intraparietalsulcus*. Die Aktivierung des linken *Intraparietalsulcus* überwiegt minimal gegenüber rechts.

#### **4.1.2 Die Verarbeitung der Mentalen Rotation im Laufe der Entwicklung**

Zur Untersuchung einer Änderung der Aktivierung im untersuchten Altersgefüge (8-19 Jahre) bei Aufgaben zur Mentalen Rotation erstellte ich eine Korrelation des Kontrast „Rotation60“ mit dem Alter. Dabei wurde untersucht, wie sich die Aktivierung des Gehirns bei Aufgaben zur Mentalen Rotation in verschiedenen Alterskategorien verhält.

Weiterhin verwendete ich bei der Erstellung der Aktivitätskarten und der statistischen Modelle die folgenden Parameter: unkorrigiert, Signifikanzniveau:  $p < 0,001$ , extent threshold: 20 Voxel.

Zuerst erstellte ich ein Renderbild des Kontrast „Rotation60“, welcher mit dem Alter der Probanden korreliert wurde. Dies bedeutet, dass die jetzt dargestellten Aktivitäten eine Zunahme der Aktivierbarkeit bei Aufgaben zur Mentalen Rotation mit steigendem Alter anzeigen. Somit zeigen jetzt jene Areale eine besonders helle Farbmarkierung, die mit steigendem Alter stärker aktiviert werden (siehe Abb. 17). Auf der Abbildung ist der größte Aktivitätszuwachs in der linken Parietalregion zu finden, die rechte Parietalregion zeigt einen deutlich geringeren Aktivitätszuwachs.



**Abb. 17: Renderdarstellung von Kontrast „Rotation60“ korreliert mit Alter**

Diese Darstellung zeigt die Areale am hellsten, welche dem größten Aktivitätszuwachs mit steigendem Alter bei Aufgaben zur Mentalen Rotation unterworfen sind. Das Maximum des Aktivitätszuwachses liegt hier in der linken Parietalregion (PL).

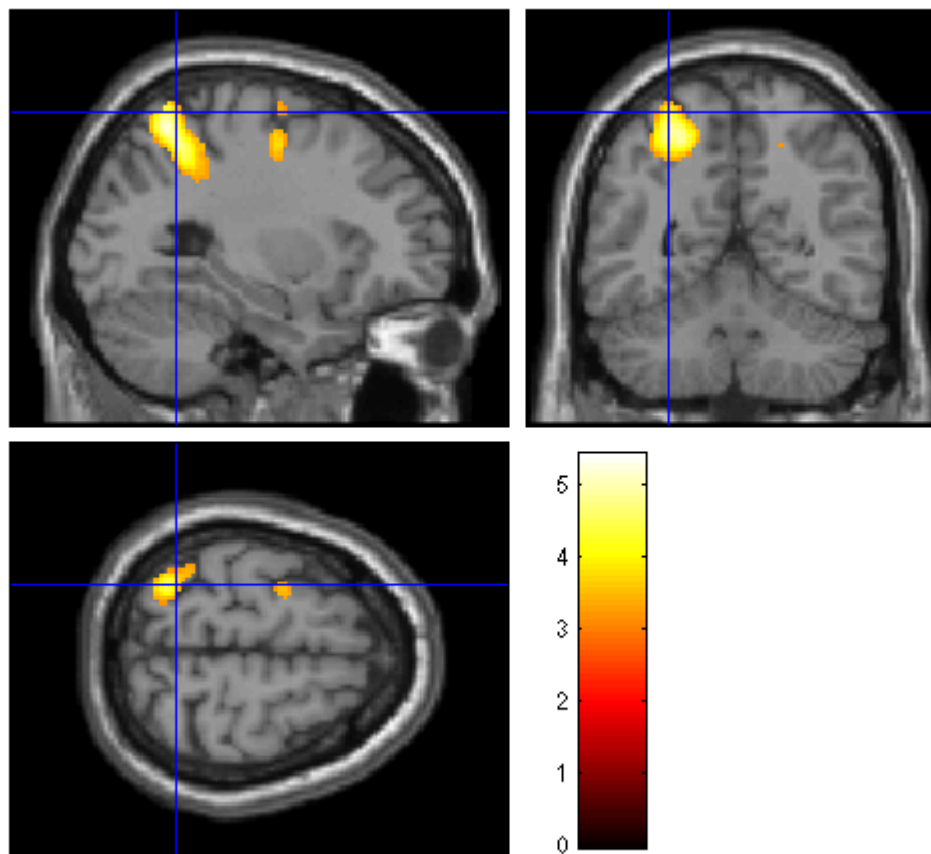
Die dazugehörige statistische Analyse (siehe Tab. 18) zeigt die Koordinaten des Clusterzentrum, den korrigierten Z-Wert und das FWE-korrigierte Signifikanzniveau des Clusters. Lediglich der linke Parietallappen zeigt ein auf 0,001 Niveau signifikantes Signal bei der alterskorrelierten Darstellung der Mentalen Rotation. Die alterskorrelierte Aktivierungsänderung des rechten Parietallappen zeigt keinen signifikanten Effekt.

**Tab. 18: Statistische Analyse des Kontrast „Rotation60“ korreliert mit Alter**

Region	MNI Koordinaten des Clusterzentrums [mm] (x y z)			korrigierter Z-Wert	p <sub>FWE kor.</sub> des Clusters
Parietallappen, links	-24	-58	+56	5,15	>0,001
Parietallappen, rechts	+22	-64	+50	3,88	n.s.

Dargestellt sind die beiden Cluster der Aktivierungsänderung im linken und im rechten Parietallappen mit den entsprechenden MNI Koordinaten, den korrigierten Z-Werten und dem FWE-korrigierten Signifikanzniveau des Clusters. Lediglich die Aktivierungsänderung im linken Parietallappen zeigt einen signifikanten Effekt ( $p < 0,001$ ).

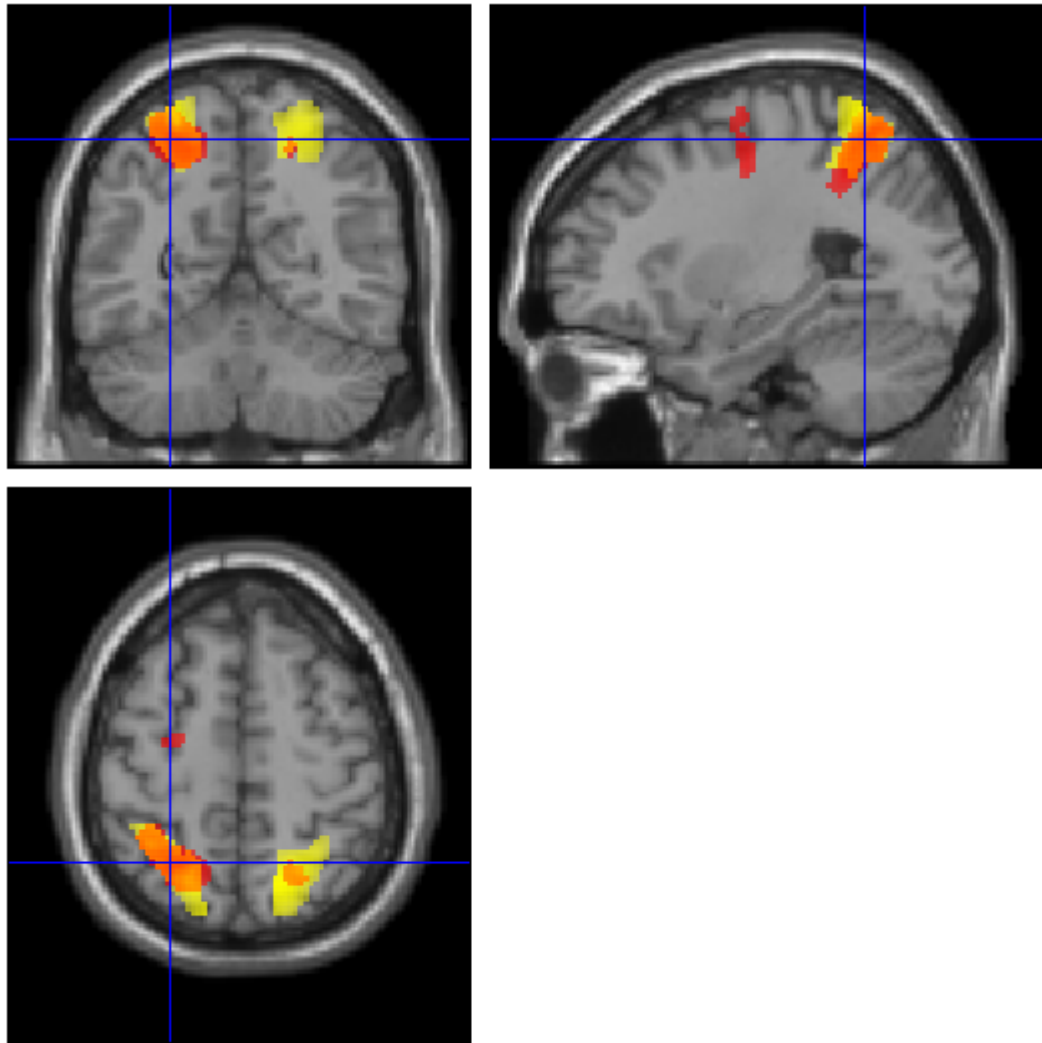
Zur genaueren Lokalisierung des gefundenen Aktivierungsareals erstellte ich eine Schnittebenen-Darstellung des alterskorrelierten Kontrast „Rotation60“ (siehe Abb. 19). Die Region des linken *Intraparietalsulcus* markierte ich im Vorhinein mit einem Fadenkreuz. Die Schnittebenen-Darstellung zeigt, dass die Stelle mit der größten Aktivitätszunahme bei Aufgaben zu Mentaler Rotation der linke *Intraparietalsulcus* ist.

**Abb. 19: Schnittebenen-Darstellung Kontrast „Rotation60“ korreliert mit Alter**

Die Abbildung zeigt den linken *Intraparietalsulcus* als die Stelle mit dem größten Aktivitätszuwachs bei Aufgaben zu Mentaler Rotation in der Entwicklung von Kindern zu Erwachsenen. Im Vorhinein wurde das Fadenkreuz zur genauen Identifizierung des *IPS* auf denselben gelegt.



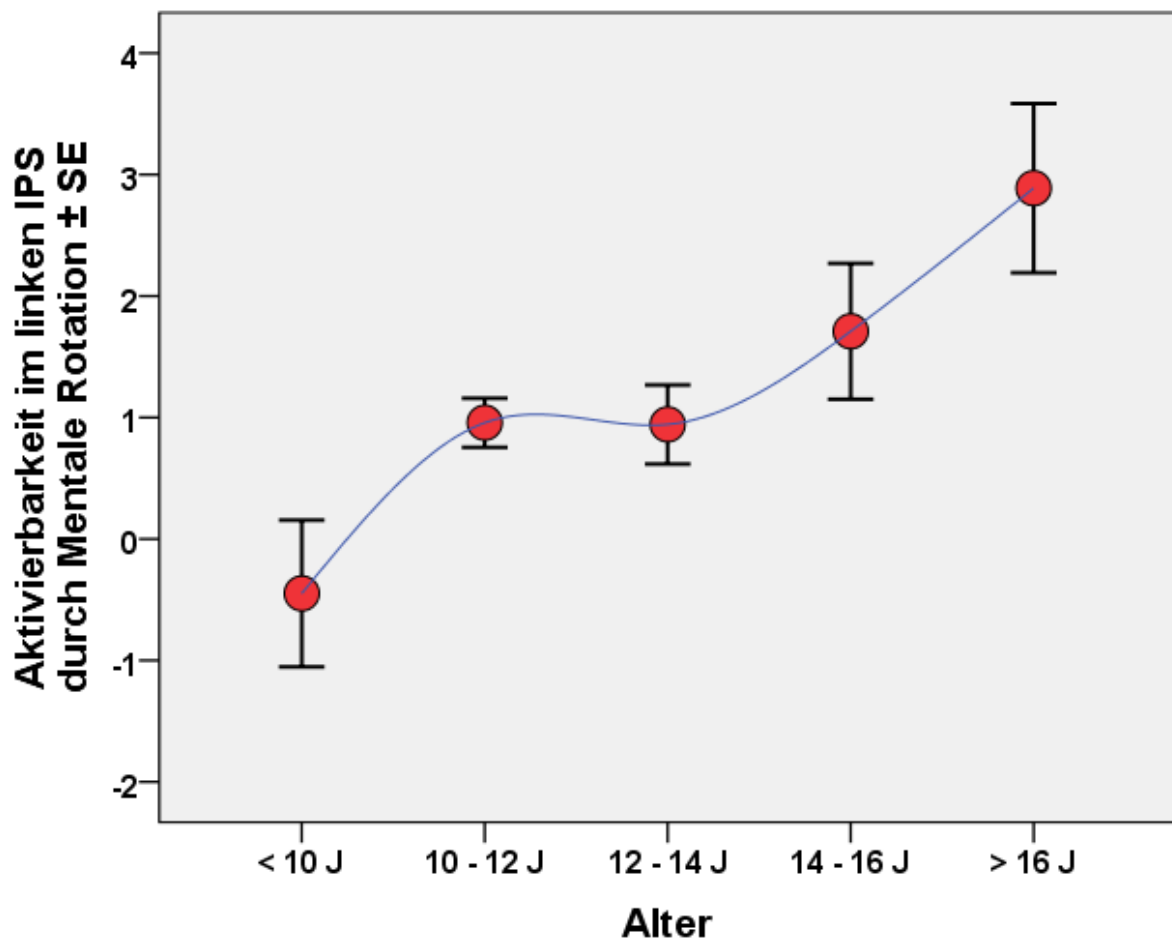
Da der *Intraparietalsulcus* bei der Darstellung des Kontrasts „Rotation60“ ohne wie auch mit einer Alterskorrelation die größte Rolle spielt, erstellte ich eine kombinierte Schnittebenen-Darstellung. Bei dieser Darstellung ist der auf die Parietalregion maskierte Kontrast „Rotation60“ ohne Alterskorrelation gelb dargestellt. Somit leuchten auf dieser Abbildung jene Regionen gelb, die in die Verarbeitung von Aufgaben zur Mentalen Rotation involviert sind. Der Kontrast „Rotation60“ mit Alterskorrelation wurde rot markiert in die Darstellung eingefügt. Somit leuchten auf dem Bild jene Regionen rot, die dem größten Aktivitätszuwachs bei der Bewältigung von Aufgaben zur Mentalen Rotation mit steigendem Alter unterliegen (siehe Abb. 20). Deutlich zu sehen ist, dass entlang des linken *Intraparietalsulcus* sich eine Schnittmenge aus der roten und der gelben Darstellung gebildet hat.



**Abb. 20: Schnittebenen-Darstellung Kontrast „Rotation60“ mit und ohne Alterskorrelation**

Die Abbildung zeigt in gelber Farbe die Regionen die zur Bewältigung von Aufgaben der Mentalen Rotation von Nöten ist. In Roter Farbe sind die Regionen dargestellt, die mit steigendem Alter einen Aktivitätszuwachs bei Aufgaben zur Mentalen Rotation erfahren.

Um die Entwicklungsdynamik des Aktivitätszuwachs im linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation darzustellen, extrahierte ich die absoluten Zahlen der Aktivierung jedes einzelnen Probanden aus den Daten der funktionellen MRT Aufnahme. Durch Zuweisung dieser Zahlen zu dem Alter des passenden Probanden erhielt ich folgendes Schaubild, auf welchem die x-Achse durch die einzelnen Alterskategorien und die y-Achse durch die Aktivierbarkeit im linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation gekennzeichnet ist (siehe Abb. 21).



**Abb. 21: Aktivierbarkeit linker IPS durch Mentale Rotation korreliert mit Alter**

Das Schaubild zeigt die Dynamik der Änderung der Aktivierbarkeit des linken *Intraparietalsulcus* durch Aufgaben zur Mentalen Rotation im Laufe der Entwicklung (Spearman-Rho: 0,2;  $p < 0,05$ ).

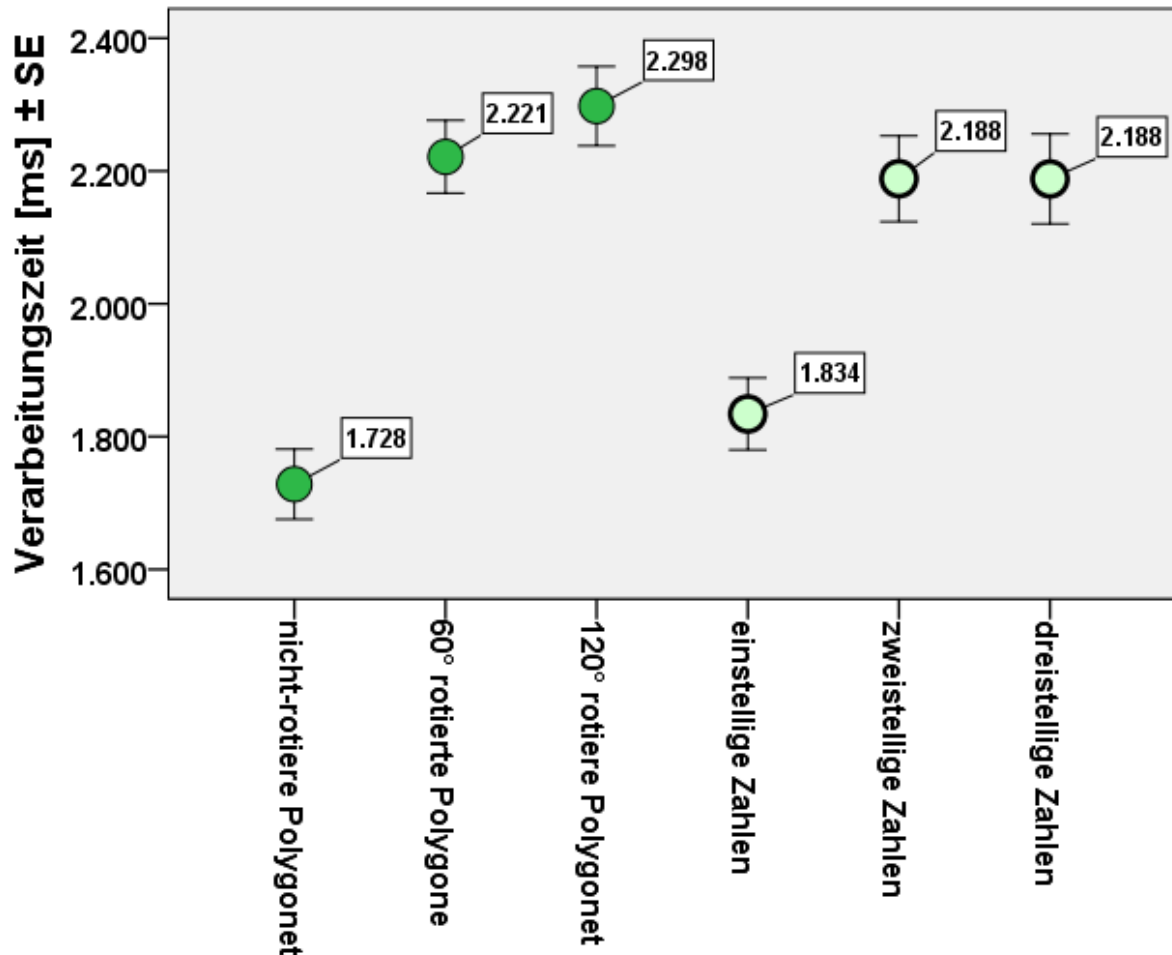
Das Schaubild zeigt einen stetigen Anstieg der Aktivierbarkeit im linken *Intraparietalsulcus* durch Aufgaben zur Mentalen Rotation. Zwischen den Alterskategorien 10-12 Jahre und 12-14 Jahre fällt der Aktivitätszuwachs geringer aus. Im Alter unter 10 Jahren und über 14 Jahren ist der Aktivitätszuwachs deutlich durch die große Steigung des Kurvenverlaufs ersichtlich.

## 4.2 Ergebnisse der Verhaltens- und Fragebogendaten

### 4.2.1 Verarbeitungszeiten

Die Verarbeitungszeiten wurden während der MRT-Messung automatisch erfasst. Sie beschreiben die Zeit, die vom sichtbar werden der Aufgabe bis zum Knopfdruck des Probanden vergeht. Auffällig ist bei der näheren Betrachtung der Verarbeitungszeit, dass bei der Aufgabe mit nicht-rotierten Polygonen sowie bei der Aufgabe mit einstelligen Zahlen die Verarbeitungszeiten deutlich kürzer und auf ungefähr gleichem Niveau ausfallen. Die Verarbeitungszeit bei 60°-rotierten und 120°-rotierten Polygonen liegt dahingegen gemittelt

um ungefähr eine halbe Sekunde höher. Ähnliches beobachtet man bei der Zahlenaufgabe: Dort liegt die Verarbeitungszeit für zwei- und dreistellige Zahlen gemittelt um ungefähr eine Drittelsekunde höher.



**Abb. 22:** Schaubilder der Verarbeitungszeiten bei den Aufgaben im MRT-Scanner

Das Schaubild zeigt die durchschnittlichen Verarbeitungszeiten der Probanden in Millisekunden auf der y-Achse. Auf der x-Achse erfolgt die Unterteilung in die verschiedenen Rotationsgrade der Polygonenaufgabe sowie die Unterteilung der Zahlenaufgabe. Auffällig ist die deutlich kürzere Verarbeitungszeit bei den nicht-rotierten Polygonen und den einstelligen Zahlen im Vergleich zu den übrigen Aufgabentypen.

#### 4.2.2 Einflussfaktoren auf die Aktivierung des *IPS* bei Mentaler Rotation

Das Ausmaß der Aktivierbarkeit des linken *Intraparietalsulcus* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation hängt von einer Fülle von Variablen ab. Im Folgenden beschränkte ich mich auf die Variablen „Alter“ und „Fehler Polygone“ als Anzeiger der räumlich-mentalen Performanz des Probanden. Die folgenden Korrelationen mit einer Fallzahl von 135 Probanden berechnete ich nach Spearman. Das Alter korrelierte ich mit einer Genauigkeit von 2 Dezimalstellen mit den absoluten Werten der Aktivierung des linken *IPS* bei Mentaler Rotation jedes Probanden.

Dabei zeigte sich eine Korrelation auf dem 0,05 Signifikanzniveau mit einem positiven Korrelationskoeffizienten (siehe Tab. 23).

**Tab. 23: Korrelation Aktivierung linker *IPS* bei Mentaler Rotation mit Alter**

Korrelationen (Spearman-Rho) n=135		
		Alter
Aktivierung durch Mentale Rotation linker <i>IPS</i>	Korrelationskoeffizient	0,196
	Signifikanz	<0,05

Die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation korreliert auf 0,05 Signifikanzniveau mit dem Alter. Es liegt ein positiver Korrelationskoeffizient vor. Berechnung nach Spearman.

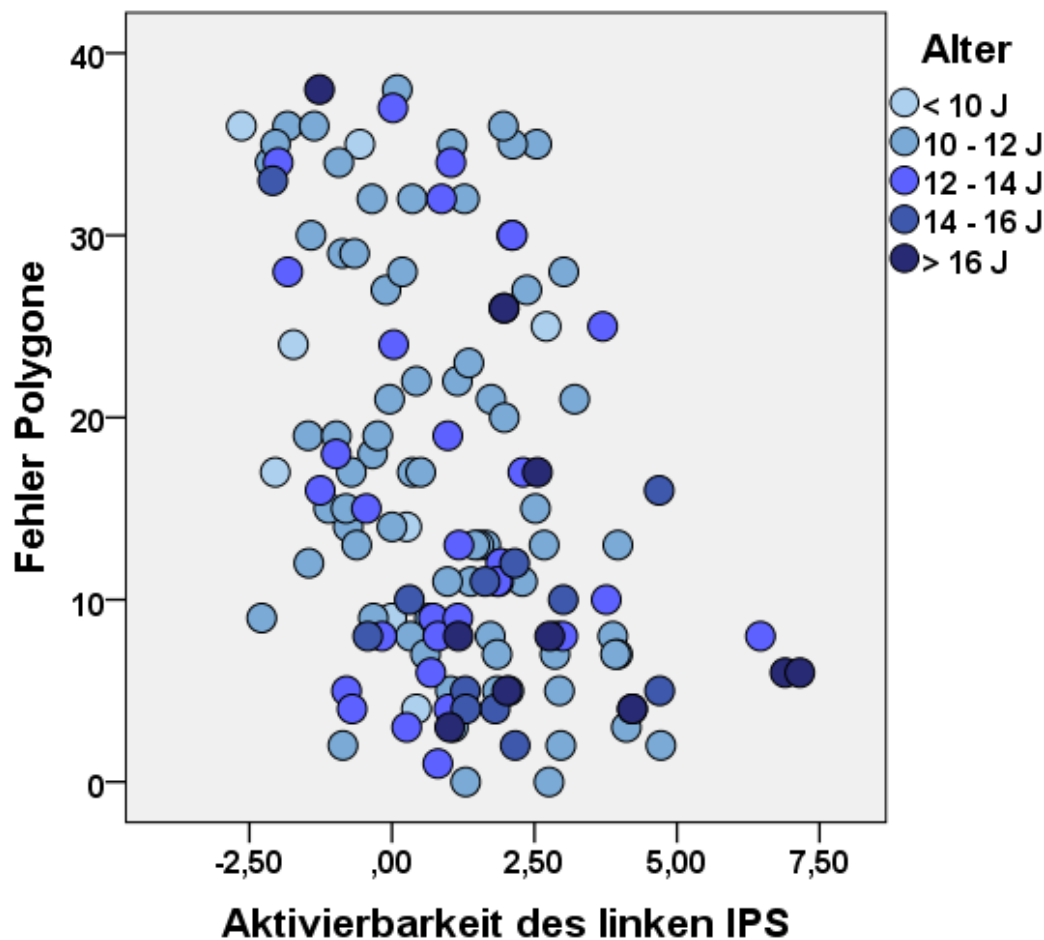
Die Betrachtung der räumlich-mentalenen Performanz der Probanden in Bezug auf die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation zeigte ebenfalls eine signifikante Korrelation. Die räumlich-mentale Performanz wurde dabei durch die absolute Anzahl an Fehlern, welche die Probanden bei der Polygonenaufgabe während der funktionellen Kernspinaufnahme machten, ausgedrückt. Ich korrelierte die Anzahl an „Fehler Polygone“ mit den absoluten Werten der Aktivierung des linken *IPS* bei Mentaler Rotation jedes Probanden. Dabei zeigte sich eine Korrelation auf dem 0,01 Signifikanzniveau mit einem negativen Korrelationskoeffizienten (siehe Tab. 24).

**Tab. 24: Korrelation Aktivierung linker *IPS* bei Mentaler Rotation mit Fehler Polygone**

Korrelationen (Spearman-Rho) n=135		
		Fehler Polygone
Aktivierung durch Mentale Rotation linker <i>IPS</i>	Korrelationskoeffizient	-0,383
	Signifikanz	<0,01

Die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation korreliert auf dem 0,01 Signifikanzniveau mit „Fehler Polygone“. Die „Fehler Polygone“ dienen als Anzeiger für die räumlich-mentale Performanz jedes Probanden. Es liegt ein negativer Korrelationskoeffizient vor. Berechnung nach Spearman.

Passend zu der Korrelation aus Tab. 24 erstellte ich ein Schaubild, bei dem auf der y-Achse die „Fehler Polygone“ und auf der x-Achse die Aktivierbarkeit des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation aufgetragen sind. Um einen farblichen Eindruck über die Altersverteilung der „Punktwolke“ zu erhalten, unterteilte ich die Gesamtzahl der Probanden in 5 verschiedenen Alterskategorien und wies jeder Altersgruppe einen Farbton zu (siehe Abb. 25). Mittels dieses Schaubildes ist ersichtlich, dass sich die Punkte der älteren Probanden (dunklere Farbtöne) im unteren Bereich der Grafik konzentrieren. Außerdem visualisiert die Grafik die negative Korrelation zwischen „Fehler Polygone“ und der Aktivierbarkeit des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation.



**Abb. 25:** Altersgruppierte Auftragung von „Fehler Polygone“ gegenüber „Aktivierbarkeit des linken IPS“

Diese Schaubild zeigt die Altersgruppenverteilung bei einer Auftragung der „Fehler Polygone“ gegenüber der Aktivierbarkeit des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation. Deutlich sieht man die Konzentration der Punkte, welche höhere Altersgruppen vertreten, im unteren Bildbereich. Des Weiteren erhält man einen visuellen Eindruck über die negative Korrelation der Parameter der x- und der y-Achse (Spearman-Rho: -0,383;  $p < 0,01$ ).

Zur genaueren Analyse der Einflussfaktoren auf die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation erstellte ich eine hierarchische lineare Regressionsanalyse. Sie wurde mehrstufig durchgeführt. Modell 1 berücksichtigt das Geschlecht und das Alter. Modell 2 beinhaltet strukturelle Merkmale des Gehirns, nämlich das Verhältnis von Weißer zu Grauer Substanz im ganzen Gehirn und im linken *IPS*. Diese Daten wurden während des anatomischen MP-RAGE Scans ermittelt und stammen aus einer Parallelstudie von Axel Neuhaus. Das dritte Modell wurde durch Performanz bestimmende Variablen ergänzt: Fehler Polygone, Fehler Zahlen, Probleme räumliches Denken und Abweichungen auf dem Zahlenstrahl. Die Werte der Fehler Polygone und Fehler Zahlen wurden während des funktionellen Kernspinscans ermittelt, wobei die Daten für Probleme räumliches Denken und die Abweichungen auf dem Zahlenstrahl aus dem Fragebogen gewonnen wurden. In der

vierten Stufe erweiterte ich die Regressionsanalyse noch um die Punkte mittlere Verarbeitungszeit bei der Polygonenaufgabe und um die mittlere Verarbeitungszeit bei der Zahlenaufgabe. Die Verarbeitungszeit umfasste die Dauer, die vom Erscheinen der Aufgabe bis zum Knopfdruck des Probanden verging. Alle vier Modelle sind auf dem 0,05 Niveau signifikant. Die erklärable Varianz zeigt in Modell 1 den geringsten Wert von 16,8% und in Modell 4 den Höchstwert von 36,6% (siehe Tab. 26).

**Tab. 26: Stufiges Regressionsmodell bezüglich der Aktivierung im linken *IPS* bei Mentaler Rotation**

Modellzusammenfassung			ANOVA
Modell	Aufgenommene Variablen	Varianz	Signifikanz
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschlecht</li> <li>• Alter</li> </ul>	16,8%	<0,05
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verhältnis GM / WM, ganzes Gehirn</li> <li>• Verhältnis GM / WM, <i>IPS</i> links</li> </ul>	20,1%	<0,05
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehler Polygone</li> <li>• Probleme räumliches Denken</li> <li>• Abweichungen auf Zahlenstrahl</li> <li>• Fehler Zahlen</li> </ul>	35,7%	<0,05
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittlere PT Polygone</li> <li>• Mittlere PT Zahlen</li> </ul>	36,6%	<0,05
Abhängige Variable: Aktivierung durch Mentale Rotation <i>IPS</i> links			

Vierstufige hierarchische lineare Regressionsanalyse der Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation. Alle Modelle sind auf dem 0,05 Niveau signifikant. Es zeigt sich eine Steigerung der Varianz von 0,168 in Modell 1 bis zu 0,366 in Modell 4.

In Tab. 27 ist der Einfluss der einzelnen Koeffizienten auf die abhängige Variable gut ersichtlich. In Modell 1 hat nur die Variable „Alter“ einen signifikanten Einfluss ( $p < 0,05$ ) mit einem positiven Regressionskoeffizienten. Dies ändert sich erst in Modell 3, nachdem in Modell 2 Parameter zu strukturellen Veränderungen und in Modell 3 Parameter zur räumlich-mentalischen Performanz der Probanden hinzugekommen sind. In Modell 3 ist der unabhängige, signifikante Einfluss ( $p < 0,05$ ) der Variablen „Alter“ und „Fehler Polygone“ auf die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation ersichtlich. Die Variable „Fehler Polygone“ hat einen negativen Regressionskoeffizienten. Das Hinzuziehen der einzelnen gemittelten Verarbeitungszeiten der Polygonen- und Zahlenaufgaben zeigt keine signifikante Änderung der Analyse, erhöhte die erklärte Varianz auch nur um lediglich 1%.

Tab. 27: Koeffizienten der Regressionsanalyse aus Tab. 26

Koeffizienten				
Modell	Variable	Vorzeichen Regressionskoeffizient	T	Signifikanz
1	Konstante	-	-1,967	n.s.
	Alter	+	3,096	<0,05
	Geschlecht	+	0,591	n.s.
2	Konstante	-	-1,414	n.s.
	Alter	+	2,728	<0,05
	Geschlecht	+	0,687	n.s.
	Verhältnis GM / WM, <i>IPS</i> links	-	-0,585	n.s.
	Verhältnis GM / WM, ganzes Gehirn	+	1,422	n.s.
3	Konstante	-	-1,859	n.s.
	Alter	+	3,002	<0,05
	Geschlecht	+	0,589	n.s.
	Verhältnis GM / WM, <i>IPS</i> links	+	0,129	n.s.
	Verhältnis GM / WM, ganzes Gehirn	+	1,505	n.s.
	Abweichungen auf Zahlenstrahl	+	1,032	n.s.
	Probleme räumliches Denken	-	-0,661	n.s.
	Fehler Zahlen	+	0,600	n.s.
	Fehler Polygone	-	-3,004	<0,05
4	Konstante	-	-1,603	n.s.
	Alter	+	2,629	<0,05
	Geschlecht	+	0,584	n.s.
	Verhältnis GM / WM, <i>IPS</i> links	+	0,306	n.s.
	Verhältnis GM / WM, ganzes Gehirn	+	1,326	n.s.
	Abweichungen auf Zahlenstrahl	+	1,167	n.s.
	Probleme räumliches Denken	-	-0,598	n.s.
	Fehler Zahlen	+	0,739	n.s.
	Fehler Polygone	-	-2,819	<0,05
	Mittlere PT Zahlen	-	-0,688	n.s.
	Mittlere PT Polygone	+	0,664	n.s.
Abhängige Variable: Aktivierung durch Mentale Rotation <i>IPS</i> links				

Unter allen untersuchten Variablen zeigen nur „Alter“ und „Fehler Polygone“ einen signifikanten und voneinander unabhängigen Einfluss auf die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation.



### 4.2.3 Einflussfaktoren auf den Parameter „Fehler Polygone“

Der Parameter „Fehler Polygone“ ist ein wichtiger Anzeiger für die räumlich-mentale Performanz der Probanden. Wie bereits weiter oben gezeigt, nimmt er auch großen Einfluss auf die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation. Zur weiteren Analyse der Abhängigkeiten von „Fehler Polygone“ erstellte ich eine Korrelation mit Parametern, die ich aus den Verhaltens- und Fragebogendaten entnommen habe. In Tab. 28 sind signifikante Korrelationen von „Fehler Polygone“ mit den Variablen „Alter“, „Note in Mathematik“, „Abweichung auf dem Zahlenstrahl“, „Probleme räumliches Denken“ und „Mittlere Verarbeitungszeit Polygone“ dargestellt. Der Parameter „Mittlere Verarbeitungszeit Polygone“ wurde während der fMRT Messung gemessen. Die Parameter „Note in Mathematik“, „Abweichungen auf dem Zahlenstrahl“ und „Probleme räumliches Denken“ entnahm ich dem Fragebogen. Die Korrelation von „Fehler Polygone“ mit dem Alter und den Problemen räumliches Denken zeigen ein 0,05 Signifikanzniveau, die weiteren drei Korrelationen zeigen ein 0,01 Signifikanzniveau. Lediglich die Korrelation mit dem Alter und der mittleren Verarbeitungszeit Polygone zeigen einen negativen Korrelationskoeffizienten.

**Tab. 28: Korrelation „Fehler Polygone“ mit Verhaltens- und Fragebogendaten**

Korrelationen (Spearman-Rho) n=135		
		Fehler Polygone
Alter	Korrelationskoeffizient	-0,214
	Signifikanz	<0,05
Note in Mathematik	Korrelationskoeffizient	0,335
	Signifikanz	<0,01
Abweichungen auf dem Zahlenstrahl	Korrelationskoeffizient	0,350
	Signifikanz	<0,01
Probleme räumliches Denken	Korrelationskoeffizient	0,262
	Signifikanz	<0,05
Mittlere Verarbeitungszeit Polygone	Korrelationskoeffizient	-0,324
	Signifikanz	<0,01

Die Tabelle zeigt signifikante Korrelationen auf 0,05 und 0,01 Niveau des Parameters „Fehler Polygone“ mit verschiedenen Variablen aus den Verhaltens- und den Fragebogendaten. Die Korrelation mit „Alter“ und mit „Mittlere RT Polygone“ zeigt einen negativen Korrelationskoeffizienten. Berechnung nach Spearman.

In Anlehnung an das Regressionsmodell aus dem vorherigen Kapitel untersuchte ich mittels eines einstufigen linearen Regressionsmodell die Einflussfaktoren auf den Parameter „Fehler Polygone“. Dabei wurden folgende Variablen in das Modell aufgenommen: Geschlecht, Alter, Mentale Rotation *IPS* links. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant und hat eine erklärbare Varianz von 0,154 (siehe Tab. 29).

**Tab. 29: Regressionsmodell bezüglich der „Fehler Polygone“**

Modellzusammenfassung			ANOVA
Modell	Aufgenommene Variablen	Varianz	Signifikanz
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschlecht</li> <li>• Alter</li> <li>• Mentale Rotation <i>IPS</i> links</li> </ul>	15,4%	<0,05
Abhängige Variable: Fehler Polygone			

Einstufige lineare Regressionsanalyse der „Fehler Polygone“. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant. Es zeigt sich eine erklärbare Varianz von 15,4%.

Die Betrachtung der einzelnen Koeffizienten in Tab. 30 zeigt, dass unter den aufgenommen Variablen nur die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation einen signifikanten Einfluss auf die Variable „Fehler Polygone“ hat ( $p < 0,01$ ; negativer Regressionskoeffizient).

**Tab. 30: Koeffizienten der Regressionsanalyse aus Tab. 29**

Koeffizienten				
Modell	Variable	Vorzeichen Regressionskoeffizient	T	Signifikanz
1	Konstante	+	4,309	<0,01
	Geschlecht	-	-1,278	n.s.
	Alter	-	-0,759	n.s.
	Mentale Rotation <i>IPS</i> links	-	-4,475	<0,01
Abhängige Variable: Fehler Polygone				

Die Tabelle zeigt, dass nur die Variable „Mentale Rotation *IPS* links“ einen signifikanten Einfluss ( $p < 0,01$ ; negativer Regressionskoeffizient) auf die abhängige Variable „Fehler Polygone“ hat. Das Alter und das Geschlecht zeigen keinen signifikanten Einfluss.

#### 4.2.4 Einflussfaktoren auf den Parameter „Alter“

In Anbetracht des Wissens über die Korrelationen der vorherigen Kapitel erstellte ich auch eine Korrelation des „Alter“ mit verschiedenen Variablen aus den Verhaltens- und Fragebogendaten. Dazu zählten: „Fehler Polygone“, „Mittlere Verarbeitungszeit Polygone“, „Mittlere Verarbeitungszeit Zahlen“, „Probleme in Mathematik“ und „Abweichungen auf dem Zahlenstrahl“. Alle Korrelationen zeigten signifikante Ergebnisse, die Korrelationen mit „Abweichungen auf dem Zahlenstrahl“ und „Mittlere Verarbeitungszeit Zahlen“ sogar auf dem 0,01 Signifikanzniveau. Lediglich die Korrelation von „Probleme in Mathematik“ mit dem Alter wies einen positiven Korrelationskoeffizienten auf (siehe Tab. 31).

**Tab. 31: Korrelation „Alter“ mit Verhaltens- und Fragebogendaten**

Korrelationen (Spearman-Rho) n=135		
		Alter
Fehler Polygone	Korrelationskoeffizient	-0,214
	Signifikanz	<0,05
Probleme in Mathematik	Korrelationskoeffizient	0,292
	Signifikanz	<0,05
Abweichungen auf dem Zahlenstrahl	Korrelationskoeffizient	-0,312
	Signifikanz	<0,01
Mittlere Verarbeitungszeit Zahlen	Korrelationskoeffizient	-0,420
	Signifikanz	<0,01
Mittlere Verarbeitungszeit Polygone	Korrelationskoeffizient	-0,178
	Signifikanz	<0,05

Es werden auf 0,01 und 0,05 Niveau signifikante Korrelation des Parameters „Alter“ mit Variablen aus den Verhaltens- und Fragebogendaten dargestellt. Lediglich die Korrelation von „Probleme in Mathematik“ mit „Alter“ zeigt einen positiven Korrelationskoeffizienten. Berechnung nach Spearman.

#### 4.2.5 Einflussfaktoren auf den Parameter „Abweichungen vom Zahlenstrahl“

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf den Parameter „Abweichungen vom Zahlenstrahl“ erstellte ich eine einstufige, lineare Regressionsanalyse mit den aufgenommenen Variablen „Geschlecht“, „Alter“ und „Mentale Rotation *IPS* links“. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant und zeigt eine erklärbare Varianz von 9,4% (siehe Tab. 32).

**Tab. 32: Regressionsmodell bezüglich der Abweichungen auf dem Zahlenstrahl**

Modellzusammenfassung			ANOVA
Modell	Aufgenommene Variablen	Varianz	Signifikanz
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschlecht</li> <li>• Alter</li> <li>• Mentale Rotation <i>IPS</i> links</li> </ul>	9,4%	<0,05
Abhängige Variable: Abweichungen auf dem Zahlenstrahl			

Einstufige lineare Regressionsanalyse der „Abweichungen auf dem Zahlenstrahl“. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant. Es zeigt sich eine erklärbare Varianz von 9,4%.

Bei der Betrachtung der Koeffiziententabelle erscheint die Variable „Alter“ als einzige mit signifikantem Einfluss ( $p < 0,05$ ; negativer Regressionskoeffizient) auf die abhängige Variable. Das Geschlecht und die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation haben keinen signifikanten Einfluss.

Tab. 33: Koeffizienten der Regressionsanalyse aus Tab. 32

Koeffizienten				
Modell	Variable	Vorzeichen Regressionskoeffizient	T	Signifikanz
1	Konstante	+	5,690	<0,01
	Geschlecht	-	-1,410	n.s.
	Alter	-	-2,487	<0,05
	Mentale Rotation <i>IPS</i> links	-	-1,120	n.s.
Abhängige Variable: Abweichungen auf dem Zahlenstrahl				

Dargestellt wird der signifikante Einfluss ( $p < 0,01$ ; negativer Regressionskoeffizient) des Alters auf die Abweichungen auf dem Zahlenstrahl. Das Geschlecht und die Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation zeigen keinen signifikanten Einfluss.

#### 4.2.6 Einflussfaktoren auf den Parameter „Note in Mathematik“

Betrachtet man die Note in Mathematik der einzelnen Probanden kann man eine signifikante Korrelation ( $p < 0,05$ ) mit der Aktivierung des linken *IPS* durch Aufgaben der Mentalen Rotation erkennen. Der Korrelationskoeffizient ist negativ (siehe Tab. 34).

Tab. 34: Korrelation „Note in Mathematik“ mit Aktivierung linker *IPS* bei Mentaler Rotation

Korrelationen (Spearman-Rho) n=135		
		Note in Mathematik
Aktivierung durch Mentale Rotation linker <i>IPS</i>	Korrelationskoeffizient	-0,219
	Signifikanz	<0,05

Die Tabelle zeigt eine auf 0,05 Niveau signifikante Korrelation zwischen der Note in Mathematik der Probanden und der Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation. Der Korrelationskoeffizient hat ein negatives Vorzeichen. Berechnung nach Spearman.

Die weitere Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Note in Mathematik zeigt die Regressionsanalyse in Tab. 35 und Tab. 36. Es ist eine einstufige lineare Regressionsanalyse mit den aufgenommen Variablen „Geschlecht“, „Alter“ und „Mentale Rotation *IPS* links“. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant und hat eine erklärbare Varianz von 6,2%.

**Tab. 35: Regressionsmodell bezüglich der Note in Mathematik**

Modellzusammenfassung			ANOVA
Modell	Aufgenommene Variablen	Varianz	Signifikanz
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschlecht</li> <li>• Alter</li> <li>• Mentale Rotation <i>IPS</i> links</li> </ul>	6,2%	<0,05
Abhängige Variable: Note in Mathematik			

Einstufige lineare Regressionsanalyse der „Note in Mathematik“. Das Modell ist auf dem 0,05 Niveau signifikant. Es zeigt sich eine erklärbare Varianz von 6,2%.

Die Auflistung der Koeffizienten der Regressionsanalyse zeigt einen signifikanten Einfluss der Variable „Mentale Rotation *IPS* links“ mit der Note in Mathematik ( $p < 0,05$ ; negativer Regressionskoeffizient). Bei der Variable „Alter“ und „Geschlecht“ besteht kein signifikanter Einfluss.

**Tab. 36: Koeffizienten der Regressionsanalyse aus Tab. 35**

Koeffizienten				
Modell	Variable	Vorzeichen Regressionskoeffizient	T	Signifikanz
1	Konstante	+	4,481	<0,01
	Geschlecht	-	-1,268	n.s.
	Alter	+	0,598	n.s.
	Mentale Rotation <i>IPS</i> links	-	-2,653	<0,05
Abhängige Variable: Note in Mathematik				

Das Modell zeigt den alleinigen signifikanten Einfluss ( $p < 0,05$ ; negativer Regressionskoeffizient) der Aktivierung des linken *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation auf die Note in Mathematik. Das Alter und das Geschlecht zeigen keinen signifikanten Einfluss.

## 5 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es das Zentrum der Aktivierung bei Bewältigung von Mentaler Rotation in einer hohen Fallzahl zu lokalisieren und eine Änderung der Aktivierung im Verlauf der Entwicklung festzustellen. Des Weiteren sollte ein Bezug zwischen numerischen Fähigkeiten und dem Vermögen zur Mentalen Rotation hergestellt werden.

### 5.1 Diskussion der Methodik

Um dieses Ziel zu erreichen war eine ausreichend große Gruppe an gesunden Probanden von Nöten. Zur Untersuchung der Veränderungen der Aktivierung im Verlauf der Entwicklung sollte das Kollektiv von Probanden auch einen möglichst großen Altersbereich, in dem diese Entwicklung vermutet wird, abdecken. Bei ähnlichen, bereits vorhandenen Studien wurde dafür eine Gruppe im Kindesalter und eine Gruppe im Erwachsenenalter miteinander verglichen. In dieser Studie sollte allerdings auch auf die Dynamik der Änderung im Rahmen des Älterwerdens eingegangen werden. Die Möglichkeit ein großes Kollektiv an Kindern zu finden, welche sich über einen Zeitraum von mehreren Jahren beobachten lässt, schied aus organisatorischen Gründen aus. So wählte ich das Design einer Querschnittsstudie und achtete darauf, dass in jeder Altersgruppe eine Grundmenge an Probanden mit ungefähr gleicher Geschlechtsverteilung vorhanden war. Die Gruppe der Probanden zwischen 10 und 14 Jahren fiel besonders groß aus, da in dieser Altersgruppe ganze Schulklassen aus der Robert-Bosch-Gesamtschule (Homburg/Saar, siehe oben) rekrutiert werden konnten. Schüler der Robert-Bosch-Gesamtschule haben schon bei vorherigen fMRT Studien mitgemacht und haben dies unter ihren Mitschüler als ein augenscheinlich spannendes und freudiges Erlebnis verbreitet. Für die Schüler waren somit auch die Motivation und der Spaß an dem Erlebten sichergestellt. Probanden, die ich auf andere Weise für die Studie gewinnen konnte, waren allerdings nicht weniger motiviert bei der Sache. Von Vorteil für die Motivation und die Aufmerksamkeit der Probanden war die Organisation in Kleingruppe von maximal 5 Teilnehmern für die Messung. So konnten die Probanden sich gegenseitig motivieren, helfen etwaige Ängste vor dem MRT zu verlieren und gemeinsam Spaß haben.

Die Mentale Rotation stand im Mittelpunkt der Studie und sollte mittels des Paradigmas möglichst exakt erfasst werden. In anderen Studien zur Mentalen Rotation verwendete man als zu rotierendes Symbol Figuren oder Objekte mit denen die Probanden eine Menge assoziieren können. Zu diesem Zweck schienen Körper aus Würfeln, Affen oder Delphine beliebt zu sein. Um eine Verfälschung des Messergebnis durch unterschiedliche Involvierung

von zum Beispiel verbalen Verarbeitungszentren während der funktionellen Messung möglichst auszuschließen, verwendete ich Polygone. Die Polygone stellten sich schon in einer vorherigen Studie als ein geeignetes Objekt ohne Assoziations-, Wiedererkennungs- oder Transformationscharakter heraus. Die späteren Ergebnisse bestätigten diese Vermutung mit einem möglichst geringen Signal zu Rausch Verhältnis, wodurch die gemessenen, involvierten Hirnareale deutlich abzugrenzen waren.

Eine scharfe Abgrenzbarkeit des aktivierten Hirnareals zur Erfassung der Mentalen Rotation brachte die Wahl des Kontrasts. Damit die Aktivierungen pro Teilnehmer vergleichbare Ergebnisse liefern, müssen bei einem Kontrast zwei Bedingungen, die sich im zu messenden Kriterium unterscheiden, in Bezug gesetzt werden. Die besten Ergebnisse bezüglich der Mentalen Rotation erbrachte der Kontrast „Rotation60“. Dieser Kontrast visualisierte die Mehraktivierung durch 60° rotierte Polygone im Vergleich zu unrotierten Polygonen. Der Kontrast „Rotation120“ konnte den gesuchten Effekt der Mentalen Rotation nicht so aussagekräftig darstellen. Das Kontrastverhalten der Gehirnaktivierung korrespondierte mit den Verhältnissen der Bearbeitungszeiten (siehe Abb. 22).

Die mentalen Prozesse während der Mentalen Rotation dienten zugleich als Vergleichsgrundlage für die Zahlenaufgabe im Rahmen einer Parallelstudie.

## **5.2 Diskussion der Ergebnisse aus den funktionellen MRT Daten**

### **5.2.1 Die Verarbeitungszentren der Mentalen Rotation**

In Zacks Metaanalyse von 2008 konnte das Zentrum für rotationsspezifische Aktivität im *Intraparietalsulcus* gefunden werden. Sowohl dieses Ergebnis als auch die Ergebnisse von Krick und Kreis aus dem Jahre 2013 konnte ich in hinreichender Fallzahl bestätigen [Zacks, 2008, Krick *et al.*, 2013]. Während der Aufgaben zur Mentalen Rotation konnte ich signifikante Aktivierungssignale beidseits in den *Intraparietalsulci*, beidseits in den dorsalen prämotorischen Kortex und beidseits in den visuellen Kortex „V5“ aufzeichnen. Die Aktivierung war beidseits in den parietalen und frontalen Regionen auf ungefähr gleichem Niveau stark. Die Aktivierung der okzipitalen Regionen fiel dahingegen etwas geringer aus. Der dorsale prämotorische Kortex dient der Planung und Ausführung motorischer Vorhaben. Dabei ist er in besonderem Maße in die Umwandlung von visuellen Informationen in ein motorisches Programm involviert. Der Teilbereich „V5“ des visuellen Kortex ist ebenso für die Erkennung und Verarbeitung von Bewegungsabläufen zuständig. Zu seinen Aufgaben zählt unter anderem die Erkennung von Fremd- und Eigenbewegung, speziell auf der Retina,

sowie ein Teilbereich der Planung für die mentale Bewegungsdurchführung. Eine Lateralität der Aktivierung in der Parietalregion wie in der Studie von Harris von dem Jahr 2000 oder der Studie von Vingerhoets im Jahre 2001 konnte ich nicht nachweisen [Harris *et al.*, 2000, Vingerhoets *et al.*, 2001]. Eine bilaterale Aktivierung entspricht allerdings auch den Ergebnissen der überwiegenden Anzahl von Studien.

Die Involvierung dieser frontalen, parietalen und okzipitalen Areale entspricht der vorpublizierten Beobachtung der Verarbeitung von Mentaler Rotation [Booth *et al.*, 2000, Liesefeld, 2011]. So konnten zum Beispiel Parson und seine Kollegen in einer PET Studie 1995 schon die Aktivierung von prämotorischen Arealen bei Mentaler Rotation feststellen [Parsons *et al.*, 1995]. Dies wurde durch weitere Studien bestätigt [Kosslyn *et al.*, 1998, Booth *et al.*, 2000, Liesefeld, 2011]. Die Involvierung der tertiären Sehrinde (V5) im Okzipitallappen ist ebenso bereits in der Literatur erwähnt [Zeki *et al.*, 1993].

Zur Bewältigung Mentaler Rotation muss zuerst die Form und die Position des Körpers durch den Probanden im Raum erkannt werden. Dies geschieht unter anderem durch die Aktivierung der tertiären Sehrinden (V5). Von dort ziehen Nervenbahnen über einen dorsalen Weg zu den Zentren des Parietallappen und des motorischen Kortex. Im nächsten Schritt muss das Arbeitsgedächtnis sich die Form und die Position des Polygons merken, um daraufhin eine Mentale Rotation motorisch zu planen. Diese motorische Planung entspricht einer Simulation der wirklichen motorischen Ausübung der Rotation, die allerdings nicht stattfindet. Nach Liesefeld geschehen ein Großteil dieser Prozesse in prämotorischen Arealen [Liesefeld, 2011]. Abgestimmt werden diese Informationen letztendlich mit dem Hauptareal der Mentalen Rotation, dem Parietallappen, um die Anforderung vollends durchzuführen. Der Parietallappen und dort insbesondere der *Intraparietalsulcus* ist damit der Hauptakteur der visuell-räumlichen Objektmanipulation [Shikata *et al.*, 2001].

In mehreren Studien wurde berichtet, dass die gleichzeitige mentale und motorische Rotation sich gegenseitig behindern [Wexler *et al.*, 1998, Ganis *et al.*, 2000, Wohlschläger, 2001, Funk *et al.*, 2005]. Aufgrund der Tatsache, dass meine Probanden keine motorische Komponente zu erfüllen hatten, ergaben sich auch keine eindeutigen Ergebnisse diesbezüglich. Allerdings wäre diese Vermutung bei der starken Aktivierung von motorischen und prämotorischen Arealen durch Mentale Rotation durchaus plausibel.



### 5.2.2 Die Mentale Rotation im Altersgefüge

Das eigentliche Augenmerk der Studie lag auf der Untersuchung der Entwicklung der Verarbeitung von Mentaler Rotation im Altersgefüge. Dazu korrelierte ich in einer Gruppenstatistik den Kontrast „Rotation60“, welcher die Aktivierung bei der Bewältigung von Mentaler Rotation präsentierte, mit dem Alter der jeweiligen Probanden. Die statistische Analyse meiner Daten bestimmte den linken *Intraparietalsulcus* als den Ort der einzigen, signifikanten Änderung der Aktivierung im Laufe der Altersreifung. Der rechte *Intraparietalsulcus* erbrachte zwar ein Signal auf der Aktivierungskarte, lieferte jedoch nach einer FWE Korrektur kein signifikantes Ergebnis. Dies bedeutet, dass der linke *Intraparietalsulcus* nicht nur ein Hauptzentrum der Verarbeitung der Mentalen Rotation ist, sondern auch der Ort, der bezüglich Mentaler Rotation einem Aktivierungszuwachs unterworfen ist. Eine starke Aktivierung der Parietallappen im Erwachsenenalter ist in verschiedenen Studien bereits aufgezeigt worden [Carpenter *et al.*, 1999, Richter *et al.*, 2000, Skagerlund und Traff, 2014].

Die Frage, wieso eine Hirnregion mit steigendem Alter eine höhere Aktivierbarkeit erfährt, könnte man unter anderem mit der anatomischen Entwicklung versuchen zu erklären. Es ist bewiesen, dass im Laufe der Hirnreifung Nervenfasern mit myelinhaltigen Nervenbahnen verstärkt werden [Supekar und Menon, 2012, Simmonds *et al.*, 2014]. Mit Hilfe besonderer Bildgebung (Diffusion Tensor Imaging) kann man die anatomischen Nervenbahnen genauer darstellen und kommt dann zu der Erkenntnis, dass genau in diesem Altersgefüge die Nervenbahnen, auch in Richtung des Parietallappens, ausgebaut werden. Für die Hirnregion bedeutet dies, dass mehr Informationen ankommen und diese dann besser und schneller verarbeitet werden können, was sich in einer gesteigerten Aktivität ausdrückt [Krick *et al.*, 2015].

Die Steigerung der Aktivierung des linken *Intraparietalsulcus* mit dem Alter konnte jedoch wesentlich seltener aufgezeigt werden. Kucian *et al.* kamen jedoch 2007 zu dem gleichen Ergebnis, dass Erwachsene bei Anforderungen zur Mentalen Rotation den linken *IPS* stärker aktivieren als Kinder [Kucian *et al.*, 2007]. Das Überwiegen der linken Seite bei der Studie von Kucian 2007 und der meinen, obwohl bei der Mentalen Rotation beide Seiten des Parietallappens involviert sind, könnte durch die Unterschiedlichkeit der Aufgaben zur Mentalen Rotation innerhalb der verschiedenen Studien bedingt sein. So wurde in vielen anderen Studien z.B. drei-dimensionale Objekte benutzt, wohingegen die Polygone in meiner Studie nur zwei-dimensional waren. Außerdem könnte man die Linkslateralität mit der

Händigkeit der Probanden versuchen zu erklären. Allerdings versuchte ich durch den stetigen Wechsel der Hand jedes Probanden, die den Knopf der Fernbedienung bei der Mentalen Rotations-Aufgabe drückt, diesen Aspekt auszuschalten. Andererseits könnte in Anlehnung an verschiedene Studien, die eine Linkslateralität als Zeichen von Reifung interpretieren, mein Ergebnis genau diesen Effekt widerspiegeln. Goldberg und Costa konnten 1981 schon zeigen, dass die linke Hemisphäre eher für bereits gelernte und trainierte Aufgaben gebraucht wird und die rechte Hemisphäre eher in die Gewinnung von Erfahrung zur Lösung neuer Aufgaben involviert ist [Goldberg und Costa, 1981]. Des Weiteren konnte durch Iacoboni in einer PET-Studie gezeigt werden, dass die linke Hemisphäre bei Übung von räumlichen Aufgaben eine größere Aktivierung zeigt [Iacoboni *et al.*, 1996]. In diesem Zusammenhang könnte man die Reifung durch das Alter mit einer Übung gleichsetzen. Ebenso konnte durch Voyer anhand von Aufgaben zur Mentalen Rotation gezeigt werden, dass mit zunehmender Übung die linke Hemisphäre mehr aktiviert wird als die rechte [Voyer, 1995]. Somit kann man sagen, dass die rechte Hemisphäre eher für das Neuerlernen von Fähigkeiten zuständig ist. Die linke Hemisphäre wird bei der Anwendung von bekannten Systemen aktiviert, worunter das wiederholte und mit dem Alter immer besser werdende Ausführen von Mentaler Rotation fällt.

Die von Heil und Jansen-Osmann postulierte Abnahme der Linkslateralität mit steigendem Alter konnte ich demnach nicht nachweisen. Diese Abnahme der Aktivierung der linken Seite deuteten sie als Hinweis auf den Wechsel von einer analytischen zu einer holistischen Strategie der Verarbeitung. Zur Untersuchung dieses Strategiewandels befragte ich die Probanden nochmals zu ihrer Herangehensweise. Das Ergebnis dieser Umfrage bestätigte den Wandel von analytischer zu holistischer Verarbeitung und ergab weiterhin, dass dieser Wandel im Altersbereich von 12 bis 14 Jahren stattfindet.

Die Gestaltung der Studie mit sehr eng abgedeckten Altersbereichen der Probanden lässt auch genauere Beobachtungen der Dynamik der Altersveränderungen im linken *Intraparietalsulcus* zu. In Abb. 21 sieht man in einer anderen Darstellungsweise erneut deutlich, dass die Aktivierbarkeit des linken *IPS* mit ansteigendem Alter bei der Bewältigung von Aufgaben zur Mentalen Rotation zunimmt (Spearman-Rho: 0,196;  $p < 0,05$ ). Allerdings wurde bisher noch kein Augenmerk auf die Dynamik dieser Änderung gelegt. Interessant ist in diesem Bezug, dass sich die Aktivierbarkeit des linken *IPS* im Altersbereich bis 12 Jahre rasant steigert. Eine ähnlich rasante Steigerung sieht man im Altersbereich über 14 Jahre. Im Alter dazwischen schreitet die Entwicklung nur deutlich langsamer voran. Diese Reduktion der Entwicklungsgeschwindigkeit kann auf vielerlei Gründen beruhen. Auffällig ist jedoch, dass

dieser Bereich auf den Höhepunkt der Pubertät fällt. Dabei könnten zum Beispiel hormonelle Veränderungen die Entwicklungsgeschwindigkeit drosseln. Andererseits könnte auch der nicht zu unterschätzende Lebenswandel der Jugendlichen in diesem Alter ein gewisses Desinteresse an Lernprozessen mit sich führen, was darauffolgend zu einer Verlangsamung der Gehirnreifung führen könnte. Um dies genauer zu analysieren, müssten weitere Untersuchungen angestellt werden.

Mit den oben neugewonnen Erkenntnissen sehe ich meine Annahme bezüglich der stetig steigenden Entwicklungsdynamik innerhalb des linken *Intraparietalsulcus* bei der Bewältigung von Mentaler Rotation als bestätigt an.

### **5.3 Diskussion der Ergebnisse aus den Verhaltens- und Fragebogendaten**

#### **5.3.1 Verarbeitungszeiten**

Durch die Aufzeichnung und die statistische Analyse der Verarbeitungszeiten konnte ich das vorpublizierte Ergebnis, dass die Verarbeitungszeit bei der Mentalen Rotation mit steigender Winkeldisparität zunimmt, anhand meiner Daten bestätigen [Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A., 1998, Funk *et al.*, 2005]. Den größten Unterschied bezüglich der Verarbeitungszeit bei den verschiedenen Aufgaben zur Mentalen Rotation zeigte die nicht-rotierten Polygonenaufgaben im Vergleich zu den 60°-rotierten und den 120°-rotierten Polygonenaufgaben. Die Verarbeitungszeit bei den 60°-rotierten und den 120°-rotierten Polygonenaufgaben lag auf ungefähr gleichem Niveau. Dieser Sachverhalt lässt sich damit begründen, dass bei den nicht-rotierten Polygonenaufgaben die Probanden einen reinen Vergleich zwischen spiegelverkehrt und nicht spiegelverkehrt vornehmen müssen. Bei den übrigen Aufgaben muss vor dem Vergleich der beiden dargestellten Polygone noch eine Mentale Rotation erfolgen, was die Verarbeitungszeit ansteigen lässt.

#### **5.3.2 Einflussfaktoren auf die Aktivierung des *IPS* bei Mentaler Rotation**

Nachdem die Frage nach der Dynamikänderung im linken *IPS* erläutert ist, gilt es im Folgenden den Beziehungen zwischen dieser speziellen Aktivierungslokalisation und numerischen Fähigkeiten sowie deren Einflussfaktoren auf den Grund zu gehen. In Anbetracht der bisherigen Erkenntnisse, dass es einen positiven signifikanten Zusammenhang zwischen der Aktivierbarkeit des linken *IPS* durch Mentale Rotation und dem Alter der Probanden gibt, war zu erwarten, dass die Performanz der Probanden ebenfalls Zusammenhänge aufzeigen wird. Als Indikator für die räumlich-mentale Performanz wählte

ich die Anzahl der Fehler, die die Probanden während der Polygonenaufgabe im Kernspintomographen machten. Sieht man die verbesserte Aktivierbarkeit des linken *IPS* als eine Art Lernen und Reifung an, so liegt die Annahme nicht fern, dass die Performanz der Probanden besser werden müsste. Diese Annahme konnte durch eine höchst signifikante Korrelation von „Fehler Polygone“ mit der Aktivierung im linken *IPS* bestätigt werden ( $p < 0,01$ ). Zusammen mit dem Wissen über die zunehmende Aktivierbarkeit des linken *IPS* mit steigendem Alter bestätigt diese negative Korrelation den von Kucian 2007 postulierten Leistungsanstieg im Altersgefüge [Kucian *et al.*, 2007]. Passend zu der steigenden Performanz mit dem Alter ist auch der Nachweis der sinkenden Verarbeitungszeit im Altersgefüge bei Mentaler Rotation [Kucian *et al.*, 2007, Krick *et al.*, 2015]. In Abb. 25 visualisierte ich die gestellte Annahme bezüglich der Performanz. Darauf ist ersichtlich, dass Kinder im jungen Alter mehr Fehler bei der Mentalen Rotation machen und dies bei einer geringeren Aktivierung des linken *IPS*. Dahingegen machen ältere Jugendliche weniger Fehler bei der Mentalen Rotation und aktivieren dabei mehr das besagte Hirnareal.

Im Folgenden möchte ich die Frage nach weiteren Einflussfaktoren auf die Aktivierbarkeit des linken *IPS* durch Mentale Rotation erläutern. Dazu erstellte ich eine hierarchische vierstufige Regressionsanalyse (siehe Tab. 26 und Tab. 27). Jede der vier Stufen erbrachte ein signifikantes Modell ( $p < 0,05$ ). Das erste Modell beinhaltete Alter und Geschlecht als Einflussfaktoren. Das zweite Modell wurde um strukturelle Veränderungen im Altersgefüge, nämlich dem Verhältnis von Grauer zu Weißer Substanz lokal am *IPS* und über das ganze Gehirn, ergänzt. Die Daten, die Modell zwei betreffen, erhielt ich aus einer VBM-Parallelstudie von Axel Neuhaus. Im dritten Modell brachte ich die Performanz bei numerischen Fähigkeiten und bei Mentaler Rotation ins Spiel und das vierte Modell komplettierte ich mit den Verarbeitungszeiten aus den Fehler- und Polygonenaufgaben. Bei dieser Fülle von Variablen könnte man annehmen, dass eine Vielzahl derer Einfluss auf die Aktivierung des linken *IPS* hat. Die Regressionsanalyse erbrachte jedoch nur zwei signifikant Einfluss nehmende Faktoren ( $p < 0,05$ ), nämlich „Fehler Polygone“ und „Alter“. Dabei konnte das abschließende, vierte Modell sogar 36,6% der Varianz erklären. Anders gesagt bedeutet dies, dass Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation unter den untersuchten Faktoren nur von der räumlich-mentalen Performanz und dem Alter der Probanden abhängt. Interessant wäre in diesem Zusammenhang die Untersuchung, wie sich die Aktivierung des linken *IPS* durch ein Training der räumlich-mentalen Performanz im Vergleich zur untrainierten Entwicklung verhält.

### 5.3.3 Einflussfaktoren auf den Parameter „Fehler Polygone“

Die räumlich-mentale Performanz ist ein Faktor, der weiterer analytischer Beobachtungen bedarf. Ich konnte signifikante Korrelationen der „Fehler Polygone“ mit der Note in Mathematik ( $p < 0,01$ ), mit den Abweichungen auf dem Zahlenstrahl ( $p < 0,01$ ), mit den Problemen des räumlichen Denkens ( $p < 0,05$ ) und mit der mittleren Verarbeitungszeit ( $p < 0,01$ ) bei der Polygonenaufgabe nachweisen. Kucian konnte 2007 zeigen, dass je älter die Probanden waren, desto weniger Fehler traten bei der Lösung von Aufgaben bezüglich Mentaler Rotation auf [Kucian *et al.*, 2007]. Dieses Ergebnis konnte ich mit der negativen Korrelation von „Fehler Polygone“ und dem „Alter“ bestätigen.

Ferner zeigt die Korrelation, dass Probanden mit schlechter Performanz bei Mentaler Rotation auch selbst angeben Probleme bei räumlichen Denkaufgaben zu haben. Des Weiteren ist bei Probanden, die viele Fehler bei der Polygonenaufgabe machten, das Vermögen Zahlengrößen abzuschätzen schlechter ausgebildet. Dies ist an der positiven Korrelation der „Fehler Polygone“ mit den Abweichungen auf dem Zahlenstrahl erkenntlich. Diese Erkenntnisse münden gemeinsam in der Feststellung, dass je höher die „Fehler Polygone“ sind auch die Note in Mathematik ausfällt. Dabei ist dann letztendlich nicht verwunderlich, dass bei Probanden mit vielen „Fehler Polygone“ auch die mittlere Verarbeitungszeit bei der Lösung der gleichen Aufgaben erhöht ist. Schließlich braucht man länger für Aufgaben, die einem viel Anstrengung abverlangen, und bei diesen für ein Individuum schwierigeren Aufgaben entstehen dann auch mehr Fehler. Diesbezüglich wurde in der auch diese Arbeit betreffenden Publikation gezeigt, dass speziell für Kinder in der Phase des Übergangs der Grund- zur weiterführenden Schule die Fähigkeit zur visuell-räumlichen Wahrnehmung zum Prädiktor für die kommende Schulart werden kann [Krick *et al.*, 2015]

Mit dem gewonnenen Vorwissen, stellte ich mir die Frage, ob denn Alter, Geschlecht oder sogar die Aktivierung des linken *IPS* bei Mentaler Rotation Einfluss auf die räumlich-mentale Performanz haben. Dies versuchte ich mit Hilfe der einstufigen, linearen Regressionsanalyse (siehe Tab. 29 und Tab. 30) zu klären. Das Modell zeigte ein Signifikanzniveau von 0,05 und konnte 15,4% der Varianz erklären. Es zeigte sich ein interessantes Ergebnis. Die einzige signifikant ( $p < 0,01$ ) Einfluss nehmende Variable war die Aktivierung des linken *IPS* bei Mentaler Rotation. Das Alter hatte keinen signifikanten Einfluss. Zusammengefasst bedeutet dies, dass eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen der räumlich-mentalen Performanz und dem Alter besteht, das Alter aber keinen Einfluss auf die Größe der räumlich-mentalen Performanz hat.

### 5.3.4 Einflussfaktoren auf den Parameter „Alter“

Zur weiteren Klärung von Abhängigkeiten der Variable „Alter“ erstellte ich weitere Korrelationen (siehe Tab. 31). Über die signifikante Korrelation mit der Variable „Fehler Polygone“ ( $p < 0,05$ ) ist schon oben berichtet worden. Weitere signifikante Ergebnisse ergaben sich für folgende Variablen: Probleme in Mathematik ( $p < 0,05$ ), Abweichungen auf dem Zahlenstrahl ( $p < 0,01$ ), mittlere Verarbeitungszeit Zahlen ( $p < 0,01$ ) und mittlere Verarbeitungszeit Polygone ( $p < 0,05$ ). Dies bedeutet, dass Probanden mit zunehmendem Alter weniger Fehler bei der Polygonenaufgabe machen und geringere Abweichungen auf dem Zahlenstrahl erzielen. Die Zahlenstrahlaufgabe verlangt dem Probanden neben numerischen Fertigkeiten auch eine genaue Einordnung von Zahlen in einen mentalen Raum ab. Dies deutet auf eine allgemeine Verbesserung der räumlich-mental Performanz hin. Dieser Sachverhalt wird durch oben genannten Korrelationen bestätigt.

Zur weiteren Analyse der Korrelation zwischen den Abweichungen auf dem Zahlenstrahl und dem Alter erstellte ich eine lineare Regressionsanalyse (siehe Tab. 32 und Tab. 33). Die abhängige Variable waren die Abweichungen auf dem Zahlenstrahl. Die Analyse war einstufig und zeigte ein Signifikanzniveau von  $p < 0,05$ . Das Modell schloss das Geschlecht, das Alter und die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation ein und erklärte 9,4% der Varianz. Die Analyse ergab, dass lediglich das Alter einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss hat. Die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation nimmt keinen signifikanten Einfluss auf die Abweichungen auf den Zahlenstrahl. Das Ergebnis, dass die Probanden bei der Einordnung der Zahlen auf dem Zahlenstrahl erreichen, hängt also unter den gemessenen Variablen am stärksten von dem Alter ab und wird nicht signifikant durch die Mentale Rotation beeinflusst. Das bedeutet jedoch nicht, dass räumliche Prozesse für die erfolgreiche Absolvierung der Zahlenstrahlaufgabe nicht notwendig wären.

Auffällig ist die Korrelation „Probleme in Mathematik“ mit dem Alter. Sie ist auf 0,05 Niveau signifikant und hat einen positiven Korrelationskoeffizienten. Die Statistik besagt, dass in meinem Probandenkollektiv mit steigendem Alter die Probleme in Mathematik zunehmen. Die Daten für „Probleme in Mathematik“ ergaben sich aus Angaben im Fragebogen bezüglich Mathematik in der Schule und in der Freizeit. Die mit zunehmendem Alter steigenden Probleme in Mathematik könnten mehrere Ursachen haben. In Betracht könnten dafür zum Beispiel die mit voranschreitender Schullaufbahn steigenden Anforderungen in der Schulmathematik und die sich daraus ergebenden Probleme bei Überforderung oder hoher Anstrengung kommen. Schlussendlich kann die genaue Ursache

dieser steigenden Probleme mit meinen Daten nicht hinreichend geklärt werden. Es bedarf weiterer, intensiverer Untersuchungen dieses speziellen Sachverhaltes.

### 5.3.5 Einflussfaktoren auf den Parameter „Note in Mathematik“

Aufgrund der bereits berichteten höchst signifikanten Abhängigkeit ( $p < 0,01$ ) von der Note in Mathematik mit den Fehler Polygonen, welche als Indikator für die räumlich-mentale Performanz dienen, widmete ich mich der Korrelation „Note in Mathematik“ und „Aktivierung durch Mentale Rotation linker *IPS*“. Auch hier zeigte sich eine signifikante Korrelation ( $p < 0,05$ ) mit einem negativen Korrelationskoeffizienten. Dies bedeutet, dass Probanden mit einer guten Mathematiknote auch eine hohe Aktivierung des linken *IPS* bei Mentaler Rotation haben. Eine weitere lineare Regressionsanalyse für die abhängige Variable „Note in Mathematik“ welche die Variablen „Geschlecht“, „Alter“ und „Mentale Rotation *IPS* links“ untersuchte, brachte weitere Erkenntnisse. Das signifikante ( $p < 0,05$ ) Modell der Regressionsanalyse (siehe Tab. 35 und Tab. 36) konnte 6,2% der Varianz erklären und zeigte die Aktivierung des linken *IPS* durch Mentale Rotation als alleinigen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einflussfaktor auf die Note in Mathematik. Das Geschlecht oder das Alter hatten keinen signifikanten Einfluss. Mit anderen Worten gesagt ist die Fähigkeit den linken *IPS* durch Mentale Rotation umfangreich zu rekrutieren ein deutlicher Einflussfaktor für die Note in Mathematik. Natürlich beruht die Notengebung nicht nur auf diesem Einflussfaktor, allerdings ist das Wissen über diesen Zusammenhang womöglich ein Baustein für die gezielte Verbesserung der Mathematiknote.

Abschließend kann ich sagen, dass bei der Fülle von gegenseitigen Abhängigkeiten und Einflüssen eine Beziehung zwischen der *IPS* Aktivität, als Repräsentant für das individuelle Vermögen zur Mentalen Rotation, und der Zahlenverarbeitung zu erkennen ist.

## 5.4 Ausblick

Der Fokus dieser Studie sollte auf dem Thema „Mentale Rotation“ mit der entsprechenden Entwicklungsdynamik liegen. Allerdings habe ich während der funktionellen MRT Messung nicht nur das Paradigma der „Mentalen Rotation“ sondern auch ein Paradigma zur numerischen Zahlenverarbeitung durch die Probanden bearbeiten lassen. Diese beiden Aufgabentypen dienten gegenseitig als Kontrollaufgaben, ergaben aber auch Daten für sich selbst. So konnte gezeigt werden, dass beide Aufgaben jeweils benachbarte oder

überlappende Netzwerke der räumlichen Verarbeitung involvieren. Es sind genau diese Areale (*IPS*, prämotorische Areale), die im Kinder- und Jugendgehirn einem intensiven strukturellen Wandel über die Schulzeit erfahren [Krick *et al.*, 2015]. Die Ergebnisse dieser Dissertation lassen annehmen, dass die Untersuchungen der Entwicklungsdynamik der Zahlenverarbeitung ebenso interessante Ergebnisse hervorbringen.

Innerhalb unserer Arbeitsgruppe konnte bereits in einer Trainingsstudie durch Frau Dr. med. Cordula Klewin gezeigt werden, dass die Möglichkeit besteht innerhalb kurzer Zeit gezielt Hirnareale zu trainieren. In ihrer Studie trainierten Kinder mit Hilfe eines Computerspiels die numerischen Fähigkeiten. Nach bereits einer Woche konnte sie eine gesteigerte Performanz der Probanden und eine höhere Aktivierbarkeit der notwendigen Hirnareale, hier insbesondere der prämotorischen Areale, feststellen [Klewin, 2015].

Übertragen auf meine Studien gilt es für zukünftige Arbeiten eine Möglichkeit zu finden, mit einem Training zur Mentalen Rotation den linken *IPS* gezielt zu schulen. Dieses Training könnte möglicherweise den Schülern helfen mathematische Probleme zu lösen und ihre Mathematiknote zu verbessern.

## 5.5 Einschränkungen dieser Studie

Die Probanden dieser Studie bestanden ausschließlich aus Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen im Alter von 8 bis 19 Jahren. Trotz einer wohlüberlegten Planung und Durchführung der Studie mussten einige Punkte besonders beachtet werden. Ich legte besonderen Wert auf die Motivation und den Spaß der Probanden an der Studie, da dies Voraussetzungen für konzentriertes, aufmerksames Arbeiten und letztendlich aussagekräftige Ergebnisse waren. Außerdem widmeten sie bei einer Messung ungefähr eineinhalb Stunden ihrer Freizeit der wissenschaftlichen Forschung, was mit einer freudigen Einstellung wesentlich einfacher in Kauf genommen wurde. Obwohl ich kein Instrument zur Messung der Aufmerksamkeit benutzte, schien ein sehr großer Teil der Probanden konzentriert zu sein und mit großem Eifer die Aufgaben zu erfüllen. Allerdings mussten ein paar wenige Ergebnisse aufgrund zu großer Bewegungsartefakte von der Studie ausgeschlossen werden. Ebenso unterlagen die Ergebnisse bei den Aufgaben zur Mentalen Rotation und der Zahlenverarbeitung der Aufmerksamkeitsspanne der einzelnen Probanden.

Darüber hinaus versuchte ich eine ausgewogene Anzahl an Probanden für die einzelnen Altersgruppen zu gewinnen. Die Altersklasse der Fünft- und Sechstklässler ist jedoch besonders stark vertreten, da bei der Rekrutierung im Klassenraum meist die ganze Klasse



begeistert war und bei der Studie mitmachen wollte. Einem Bewerber die Teilnahme an der Studie ohne triftigen Grund zu untersagen, stand zu keinem Zeitpunkt zur Debatte.

Unabhängig von den Probanden sollte ebenso beachtet werden, dass es sich hierbei um eine funktionelle MRT Studie handelt. Die funktionelle MRT Bildgebung ist im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren ein sehr junges Verfahren mit einer eingeschränkten räumlichen Auflösung. Die gemessenen und dargestellten Hirnareale dienen einer Vielzahl von komplexen und bisher nicht vollständig verstandenen Verschaltungen. Deshalb sehe ich die von mir präsentierten Funktionen der Hirnareale eher als eine sehr spezifische Beobachtung eines äußerst umfangreichen Systems. Sicherlich haben diese Areale eigenständig, aber auch durch die Verknüpfung mit weiteren Hirnarealen, eine Fülle von anderen allgemeinen und speziellen Funktionen.

## **5.6 Schlussfolgerung**

Durch die Ergebnisse dieser Studien konnte meine Annahme, dass die Aktivierbarkeit des *IPS* bei Aufgaben zur Mentalen Rotation einer stetig steigenden Dynamik im Laufe der Entwicklung vom Kind zum Erwachsenen unterliegt (Hypothese 1), bestätigt werden.

Des Weiteren konnte durch diese Studie meine Vorhersage, dass eine enge Abhängigkeit der numerischen Performanz von dem individuellen Vermögen zur Mentalen Rotation vorhanden ist (Hypothese 2), bewiesen werden.

## Literaturverzeichnis

1. Alivisatos B, Prides M (1997) Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia* 35: 111-118.
2. Blakemore SJ, Mills KL (2014) Is adolescence a sensitive period for sociocultural processing? *Annual Review of Psychology* 65: 187-207.
3. Booth JR, MacWhinney B, Thulborn KR, Sacco K, Voyvodic JT, Feldman HM (2000) Developmental and lesion effects in brain activation during sentence comprehension and mental rotation. *Developmental neuropsychology* 18: 139-169.
4. Booth JR, Macwhinney B, Thulborn KR, Sacco K, Voyvodic J, Feldman HM (1999) Functional organization of activation patterns in children: whole brain fMRI imaging during three different cognitive tasks. *Progress in neuro-psychopharmacology & biological psychiatry* 23: 669-682.
5. Bremmer F, Schlack A, Shah NJ, Zafiris O, Kubischik M, Hoffmann K, Zilles K, Fink GR (2001) Polymodal motion processing in posterior parietal and premotor cortex: a human fMRI study strongly implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron* 29: 287-296.
6. Bugden S, Price GR, McLean DA, Ansari D (2012) The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental cognitive neuroscience* 2: 448-457.
7. Carpenter PA, Just MA, Keller TA, Eddy W, Thulborn K (1999) Graded functional activation in the visuospatial system with the amount of task demand. *Journal of cognitive neuroscience* 11: 9-24.
8. Cooper, L.A., Shepard, R.N. (1982) Chronometric studies of the rotation of mental images. *Mental images and their trans- formation*: 72-121.
9. Dehaene S, Molko N, Cohen L, Wilson AJ (2004) Arithmetic and the brain. *Current opinion in neurobiology* 14: 218-224.
10. Dehaene S, Spelke E, Pinel P, Stanescu R, Tsivkin S (1999) Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science (New York, N.Y.)* 284: 970-974.
11. Dehaene S (1992) Varieties of numerical abilities. *Cognition* 44: 1-42.
12. Eickhoff SB, Paus T, Caspers S, Grosbras MH, Evans AC, Zilles K, Amunts K (2007) Assignment of functional activations to probabilistic cytoarchitectonic areas revisited. *NeuroImage* 36: 511-521.
13. Eickhoff SB, Stephan KE, Mohlberg H, Grefkes C, Fink GR, Amunts K, Zilles K (2005) A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage* 25: 1325-1335.
14. Frick A, Daum MM, Walser S, Mast FW (2005) Developmental changes in the interference of motor processes with mental rotation. *Proceedings of the XXVII Annual Conference of the Cognitive Science Society* 700-725.
15. Funk M, Brugger P, Wilkening F (2005) Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science* 402-408.

16. Ganis G, Keenan JP, Kosslyn SM, Pascual-Leone A (2000) Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation. 175-180.
17. Gerardin E, Sirigu A, Lehericy S, Poline J-, Gaymard B, Marsault C (2000) Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cerebral Cortex* 10: 93-110.
18. Geyer S (2004) The microstructural border between the motor and the cognitive domain in the human cerebral cortex. *Advances in Anatomy, Embryology, and Cell Biology* 174: I-VIII, 1-89.
19. Goldberg E, Costa LD (1981) Hemisphere differences in the acquisition and use of descriptive systems. *Brain and language* 14: 144-173.
20. Harris IM, Miniussi C (2003) Parietal lobe contribution to mental rotation demonstrated with rTMS. *Journal of cognitive neuroscience* 15: 315-323.
21. Harris IM, Egan GF, Sonkkila C, Tochon-Danguy HJ, Paxinos G, Watson JD (2000) Selective right parietal lobe activation during mental rotation: a parametric PET study. *Brain : a journal of neurology* 123 ( Pt 1): 65-73.
22. Hegarty, M. & Waller, D. (2005) Individual differences in spatial abilities. 121-169.
23. Heil, M. & Jansen-Osmann, P. (2006) Developmental aspects of hemispheric asymmetry during mental rotation.
24. Hyun J-, Luck SJ (2007) Visual working memory as the substrate for mental rotation. *Psychonomic Bulletin & Review* 15: 154-158.
25. Iacoboni M, Woods RP, Mazziotta JC (1996) Brain-behavior relationships: evidence from practice effects in spatial stimulus-response compatibility. *Journal of neurophysiology* 76: 321-331.
26. Jordan K, Heinze HJ, Lutz K, Kanowski M, Jäncke L (2001) Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage* 14: 143-152.
27. Jordan K, Wustenberg T, Heinze HJ, Peters M, Jancke L (2002) Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia* 40: 2397-2408.
28. Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1985) Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability. *Psychological Review*: 137-172.
29. Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976) Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*: 441-480.
30. Klewin C (2015) Das Mathemonster: fMRI-Trainingsstudie zur räumlichen Zahlenverarbeitung bei Kindern.
31. Kosslyn SM, DiGirolamo GJ, Thompson WL, Alpert NM (1998) Mental rotation of objects versus hands: neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology* 35: 151-161.
32. Krick CM, Neuhaus A, Klewin C, Wörner T, Kreis S, Reith W (2015) fMRT und DTI bei Entwicklungsverzögerung der Zahlenverarbeitung. *Der Radiologe* 1-6.
33. Krick CM, Kreis S, Paulus F, Reith W (2013) Zur Biologie der Mathematik. *MNU* 66/2 68-75.

34. Kucian K, von Aster M, Loenneker T, Dietrich T, Mast FW, Martin E (2007) Brain activation during mental rotation in school children and adults. *Journal of neural transmission* (Vienna, Austria : 1996) 114: 675-686.
35. Lamm C, Windischberger C, Moser E, Bauer H (2007) The functional role of dorso-lateral premotor cortex during mental rotation: an event-related fMRI study separating cognitive processing steps using a novel task paradigm. *NeuroImage* 36: 1374-1386.
36. Liesefeld R (2011) The Mental Representation in Mental Rotation.
37. Linn MC, Petersen AC (1985) Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child development* 56: 1479-1498.
38. Logothetis NK, Pauls J, Augath M, Trinath T, Oeltermann A (2001) Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature* 412: 150-157.
39. Lohaus A, Schuhmann-Hengstler R, Kessler T (1999) Räumliches Denken im Kindesalter. Göttingen: Hogrefe .
40. Lohmann DF (1979) Spatial ability: Review and re-analysis of the correlational literature.
41. Malikovic A, Amunts K, Schleicher A, Mohlberg H, Eickhoff SB, Wilms M, Palomero-Gallagher N, Armstrong E, Zilles K (2007) Cytoarchitectonic analysis of the human extrastriate cortex in the region of V5/MT+: a probabilistic, stereotaxic map of area hOc5. *Cerebral cortex* (New York, N.Y.: 1991) 17: 562-574.
42. Marmor GS (1977) Mental rotation and number conservation: Are they related? 320-325.
43. Marmor GS (1975) Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? 548-559.
44. Parsons LM, Fox PT, Downs JH, Glass T (1995) Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. 54-58.
45. Picard N, Strick PL (2001) Imaging the premotor areas. *Current Opinion in Neurobiology* 663-672.
46. Pinel P, Dehaene S, Riviere D, LeBihan D (2001) Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage* 14: 1013-1026.
47. Prime DJ, Jolicoeur P (2010) Mental rotation requires visual short-term memory: Evidence from human electric cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2437-2446.
48. Richter W, Somorjai R, Summers R, Jarmasz M, Menon RS, Gati JS, Georgopoulos AP, Tegeler C, Ugurbil K, Kim SG (2000) Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *Journal of cognitive neuroscience* 12: 310-320.
49. Richter W, Ugurbil K, Georgopoulos A, Kim SG (1997) Time-resolved fMRI of mental rotation. *Neuroreport* 8: 3697-3702.
50. Rivera SM, Reiss AL, Eckert MA, Menon V (2005) Developmental changes in mental arithmetic: evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral cortex* (New York, N.Y.: 1991) 15: 1779-1790.

51. Scheperjans F, Eickhoff SB, Homke L, Mohlberg H, Hermann K, Amunts K, Zilles K (2008) Probabilistic maps, morphometry, and variability of cytoarchitectonic areas in the human superior parietal cortex. *Cerebral cortex* (New York, N.Y.: 1991) 18: 2141-2157.
52. Shepard RN, Metzler J (1971) Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* (New York, N.Y.) 171: 701-703.
53. Shikata E, Hamzei F, Glauche V, Knab R, Dettmers C, Weiller C, Buchel C (2001) Surface orientation discrimination activates caudal and anterior intraparietal sulcus in humans: an event-related fMRI study. *Journal of neurophysiology* 85: 1309-1314.
54. Silver MA, Kastner S (2009) Topographic maps in human frontal and parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences* 488-495.
55. Simmonds DJ, Hallquist MN, Asato M, Luna B (2014) Developmental stages and sex differences of white matter and behavioral development through adolescence: a longitudinal diffusion tensor imaging (DTI) study. *NeuroImage* 92: 356-368.
56. Skagerlund K, Traff U (2014) Development of magnitude processing in children with developmental dyscalculia: space, time, and number. *Frontiers in psychology* 5: 675.
57. Souvignier E (2000) Förderung räumlicher Fähigkeiten: Trainingsstudien mit lernbeeinträchtigten Kindern.
58. Supekar K, Menon V (2012) Developmental maturation of dynamic causal control signals in higher-order cognition: a neurocognitive network model. *PLoS computational biology* 8: e1002374.
59. Tagaris GA, Kim SG, Strupp JP, Andersen P, Ugurbil K, Georgopoulos AP (1997) Mental rotation studied by functional magnetic resonance imaging at high field (4 tesla): performance and cortical activation. *Journal of cognitive neuroscience* 9: 419-432.
60. Tagaris GA, Kim SG, Strupp JP, Andersen P, Ugurbil K, Georgopoulos AP (1996) Quantitative relations between parietal activation and performance in mental rotation. *Neuroreport* 7: 773-776.
61. Tamnes CK, Ostby Y, Fjell AM, Westlye LT, Due-Tønnessen P, Walhovd KB (2010) Brain maturation in adolescence and young adulthood: regional age-related changes in cortical thickness and white matter volume and microstructure. *Cerebral cortex* (New York, N.Y.: 1991) 20: 534-548.
62. Thomsen T, Hugdahl K, Ersland L, Barndton R, Lundervold A, Smievoll AI, Roscher BE, Sundberg H (2000) Functional magnetic resonance imaging (fMRI) study of sex differences in a mental rotation task. *Medical science monitor : international medical journal of experimental and clinical research* 6: 1186-1196.
63. Vingerhoets G, Santens P, Van Laere K, Lahorte P, Dierckx RA, De Reuck J (2001) Regional brain activity during different paradigms of mental rotation in healthy volunteers: a positron emission tomography study. *NeuroImage* 13: 381-391.
64. Voyer D (1995) Effect of practice on laterality in a mental rotation task. *Brain and cognition* 29: 326-335.
65. Weiss E, Siedentopf CM, Hofer A, Deisenhammer EA, Hoptman MJ, Kremser C, Golaszewski S, Felber S, Fleischhacker WW, Delazer M (2003) Sex differences in brain activation pattern during a

visuospatial cognitive task: a functional magnetic resonance imaging study in healthy volunteers. Neuroscience letters 344: 169-172.

66. Wexler M, Kosslyn SM, Berthoz A (1998) Motor processes in mental rotation. Cognition: 161-176.

67. Wohlschläger A (2001) Mental object rotation and the planning of hand movements. 709-718.

68. Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A. (1998) Mental and manual rotation. 397-412.

69. Zacks JM (2008) Neuroimaging studies of mental rotation: a meta-analysis and review. Journal of cognitive neuroscience 20: 1-19.

## Anhang

**Fragebogen für Schüler zum Thema  
Raum/Zahl/Mathematik**

Datum: .....

Name: ..... Vorname:

.....

Ich bin ein Mädchen ☐ / ein Junge ☐

Geburtsdatum: ..... Klasse:

.....

Schule:

.....

**Info: Der Fragebogen beinhaltet unterschiedliche Fragetypen. Deshalb gibt es für jeden Teil eine eigene Art, die Fragen zu beantworten. Wie genau du antworten sollst, wird jeweils erklärt.**

**Dieses Deckblatt wird nachher vom übrigen Fragebogen getrennt, damit niemand sehen kann, zu wem die nächstfolgenden Angaben gehören. Daher kannst du ganz ehrlich antworten.**

**Der Fragebogen bekommt nur eine anonyme Nummer, die keinen Rückschluss auf deine Person zulässt. Diese Nummer wird von uns per Zufall erfunden.**

Nummer des Fragebogens: .....

Kürzel des Datensatzes: .....

Nummer des Fragebogens: ..... (dient der Anonymisierung)

**Bitte nenne uns deine Noten, die du im letzten Jahreszeugnis in Mathe und Deutsch bekommen hast! – Diese und alle folgenden Angaben werden NICHT an andere Menschen weitergegeben!**

Ich hatte im letzten Jahreszeugnis in Mathe eine: \_\_\_\_

Ich hatte im letzten Jahreszeugnis in Deutsch eine: \_\_\_\_

Jetzt folgt eine Liste von Eigenschaften und Verhaltensweisen, die bei Jugendlichen auftreten können. Nach jeder Eigenschaft findest du die Ziffern 0,1,2. Bei jeder Eigenschaft, die für dich jetzt oder in den letzten sechs Monaten genau so oder häufig zutrifft, kreuzt du bitte die Ziffer 2 an. Wenn die Eigenschaft etwas oder manchmal zutrifft, kreuzt du bitte die Ziffer 1 an, und wenn sie für dich nicht zutrifft, die Ziffer 0. Beantworte bitte alle Fragen so gut du kannst, auch wenn dir einige unpassend erscheinen.

0= nicht zutreffend 1=etwas oder manchmal zutreffend 2=genau oder häufig zutreffend

Ich verhalte mich zu jung für mein Alter ..... 0 1 2

Ich habe Schwierigkeiten mich zu konzentrieren

oder länger aufzupassen..... 0 1 2

Ich kann nicht lange stillsitzen..... 0 1 2

Ich fühle mich einsam ..... 0 1 2

Ich bin durcheinander oder zerstreut ..... 0 1 2

Ich weine viel..... 0 1 2



**0= nicht zutreffend 1=etwas oder manchmal zutreffend 2=genau oder häufig zutreffen**

Ich bin tagsüber verträumt oder in Gedanken.....	0	1	2
Ich habe mich absichtlich verletzt oder versucht mich umzubringen .....	0	1	2
Ich habe Angst etwas Schlimmes zu denken oder zu tun.....	0	1	2
Ich glaube ich muss perfekt sein und alles gut können.....	0	1	2
Ich glaube, dass mich niemand mag .....	0	1	2
Ich glaube, dass andere mir etwas antun wollen.....	0	1	2
Ich fühle mich wertlos oder unterlegen.....	0	1	2
Ich tue etwas ohne zu überlegen.....	0	1	2
Ich bin nervös, reizbar oder angespannt.....	0	1	2
Ich bin zu furchtsam oder zu ängstlich .....	0	1	2
Ich habe starke Schuldgefühle .....	0	1	2
Ich bin schlecht in der Schule .....	0	1	2
Ich bin unbeholfen oder schwerfällig .....	0	1	2
Ich bin schüchtern oder werde leicht verlegen .....	0	1	2
Ich bin misstrauisch.....	0	1	2
Ich denke darüber nach, mich umzubringen .....	0	1	2
Ich bin unglücklich, traurig oder niedergeschlagen .....	0	1	2
Ich mache mir viele Sorgen .....	0	1	2

**Jetzt kommen einige Fragen, bei denen es um deine Erfahrungen mit Mathematik geht. Hierbei gibt es keine richtigen und falschen Antworten. Bitte antworte ehrlich und kreuze die Antwort an, die am besten auf dich zutrifft! Kreuze dafür jeweils die passende Ziffer an. Auch wenn du dir nicht sicher bist, kreuze trotzdem die Ziffer an, die am besten auf dich zutrifft!**

**0 = trifft überhaupt nicht zu**

**1 = trifft kaum oder selten zu**

**2 = trifft in etwa oder manchmal zu**

**3 = trifft vollkommen oder häufig zu**

Den am Tag zuvor gelernten/und richtig angewandten Mathestoff habe ich am Tag darauf wieder vergessen.	0	1	2	3
Meine Noten in den Matheschulaufgaben variieren sehr stark. Gute Noten wechseln sich mit ungenügenden ab.	0	1	2	3
Bei Sach-/Textaufgaben weiß ich nicht, welchen Rechenweg ich anwenden soll.	0	1	2	3
Mir machen Klassenarbeiten in Mathematik Spaß.	0	1	2	3
Vor einer Matheschulaufgabe denke ich, dass ich gut abschneiden werde.	0	1	2	3
Vor einer Mathearbeit geht es mir nicht gut, ich bekomme z.B. Bauchweh, Kopfschmerzen oder Durchfall.	0	1	2	3
Ich versuche mich so wenig wie möglich mit Mathematik zu beschäftigen.	0	1	2	3
Ich denke, dass ich <b>nicht</b> gut im Rechnen bin.	0	1	2	3
Ich habe Angst vor Mathetests und denke, dass ich schlecht abschneiden werde.	0	1	2	3
Ich fühle mich von den Anforderungen der Mathetests überfordert.	0	1	2	3
Ich beschäftige mich über die Hausaufgaben hinaus mit Mathematik.	0	1	2	3
Ich finde die Aufgaben der Mathetests zu einfach.	0	1	2	3

**Jetzt noch ein paar speziellere Fragen, die nicht unbedingt auf dich zutreffen müssen! Bitte kreuze jeweils „Ja“ oder „Nein“ an! Bitte antworte auch hier wieder ehrlich!**

Wurdest du schon einmal gesondert bezüglich deiner Fähigkeiten in Mathe untersucht? Also unabhängig von deinen Klassenkameraden und den normalen Schularbeiten?	Ja	Nein
---	----	------

**Falls du „Ja“ angekreuzt hast, dann beantworte bitte folgende Fragen!**

Wurde dabei ein Ergebnis erzielt und festgestellt, dass du im Vergleich zu anderen Kindern <u>stärkere Probleme</u> mit Mathe hast?	Ja	Nein
Wurde dabei ein Ergebnis erzielt und festgestellt, dass du es im Vergleich zu anderen Kindern <u>leichter</u> in Mathe hast?	Ja	Nein

**Nun folgen noch fünf kurze Rechenaufgaben. Du sollst beurteilen bei welchen der Aufgaben du deiner Meinung nach mit einer schriftlichen Lösung schneller wärst als mit dem Kopfrechnen. Schaue dir dafür zunächst jede Aufgabe genau an und antworte auch hier wieder ehrlich! Wähle bitte die Antwort, die am besten passt und mache bei jeder Aufgabe ein Kreuz!**

**Kreuze die Ziffer 1 an, wenn du die Aufgabe im Kopf lösen würdest, und kreuze die Ziffer 2 an, wenn du die Aufgabe schriftlich lösen würdest.**

**1= ich würde die Aufgabe im Kopf lösen**

**2= ich würde die Aufgabe schriftlich lösen**

?-28=27	1	2
78-29 =?	1	2
238-146=?	1	2
300,04x100 =?	1	2
75m=?km	1	2

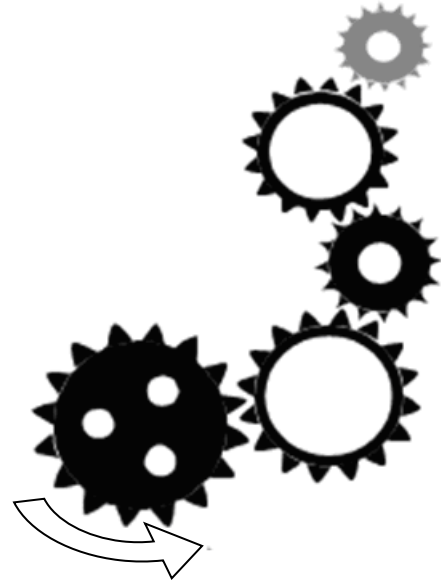
**Danke, dass du die Fragen beantwortet hast!**  
**Jetzt kommen noch ein paar Aufgaben die anders sind als die gerade eben. Bei ihnen ist vor allem deine Vorstellungskraft gefragt! Viel Spaß!**

Bitte markiere, in welche Richtung sich das **graue** Zahnrad dreht!  
 Der Pfeil gibt dir an, in welche Richtung sich erste das Zahnrad am anderen Ende der Reihe dreht. Die Räder dazwischen können sich in verschiedene Richtungen drehen!

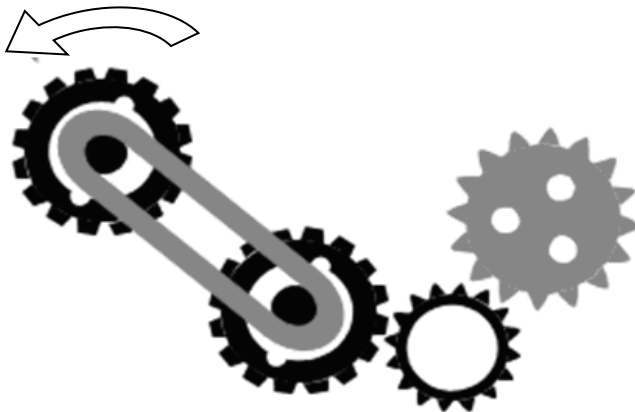
Das graue Zahnrad dreht sich nach:



links: ☐ rechts: ☐

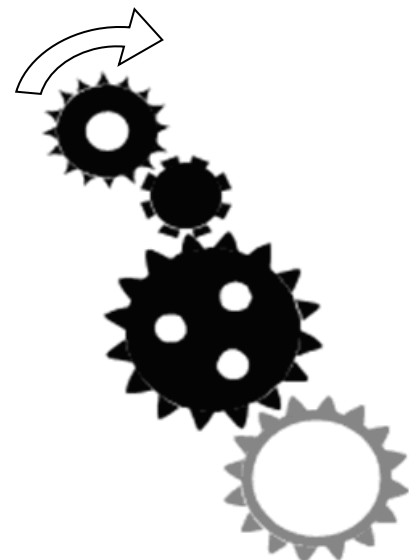


links: ☐ rechts: ☐



links: ☐ rechts: ☐

Das graue Zahnrad dreht sich nach:



links: ☐ rechts: ☐

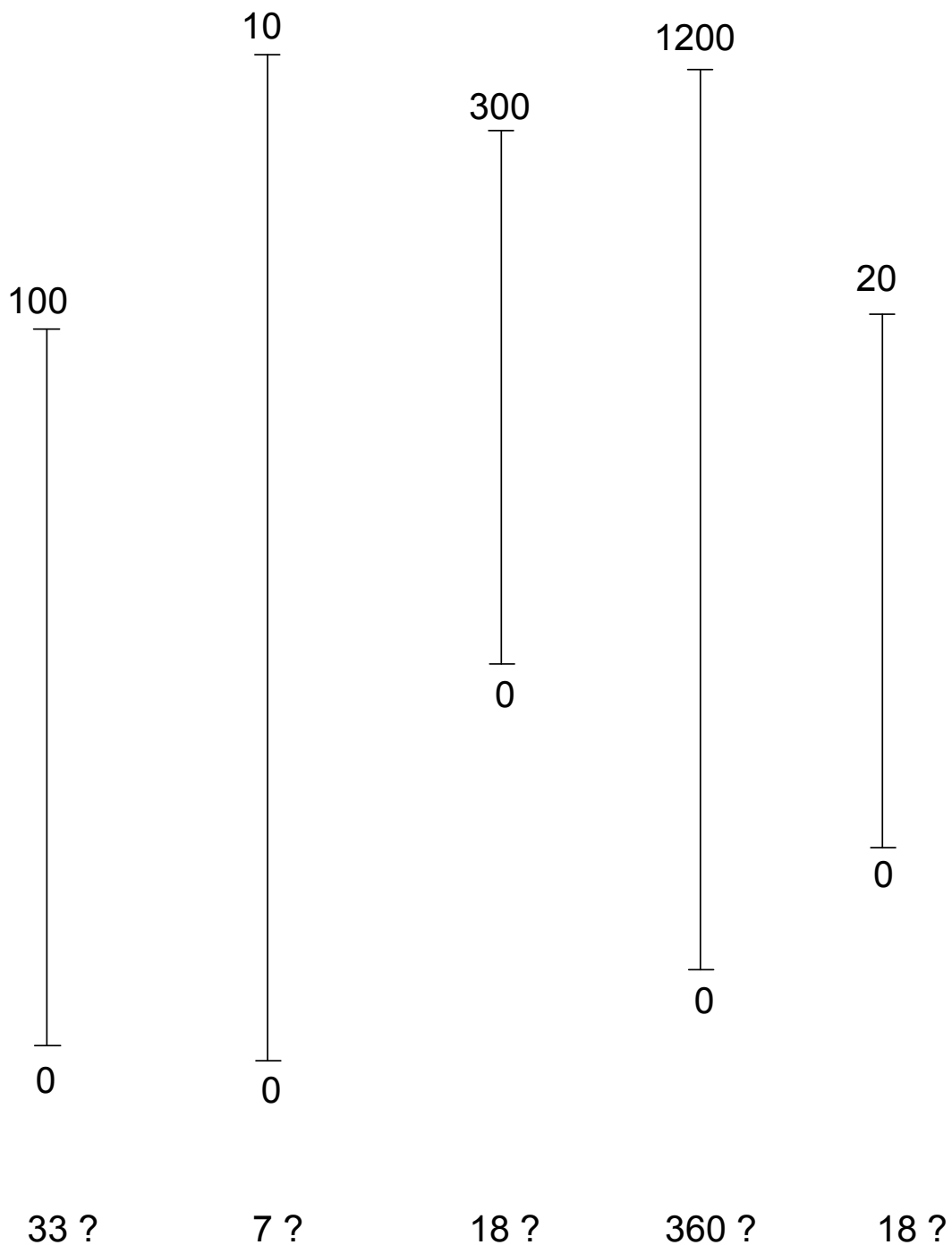


links: ☐ rechts: ☐

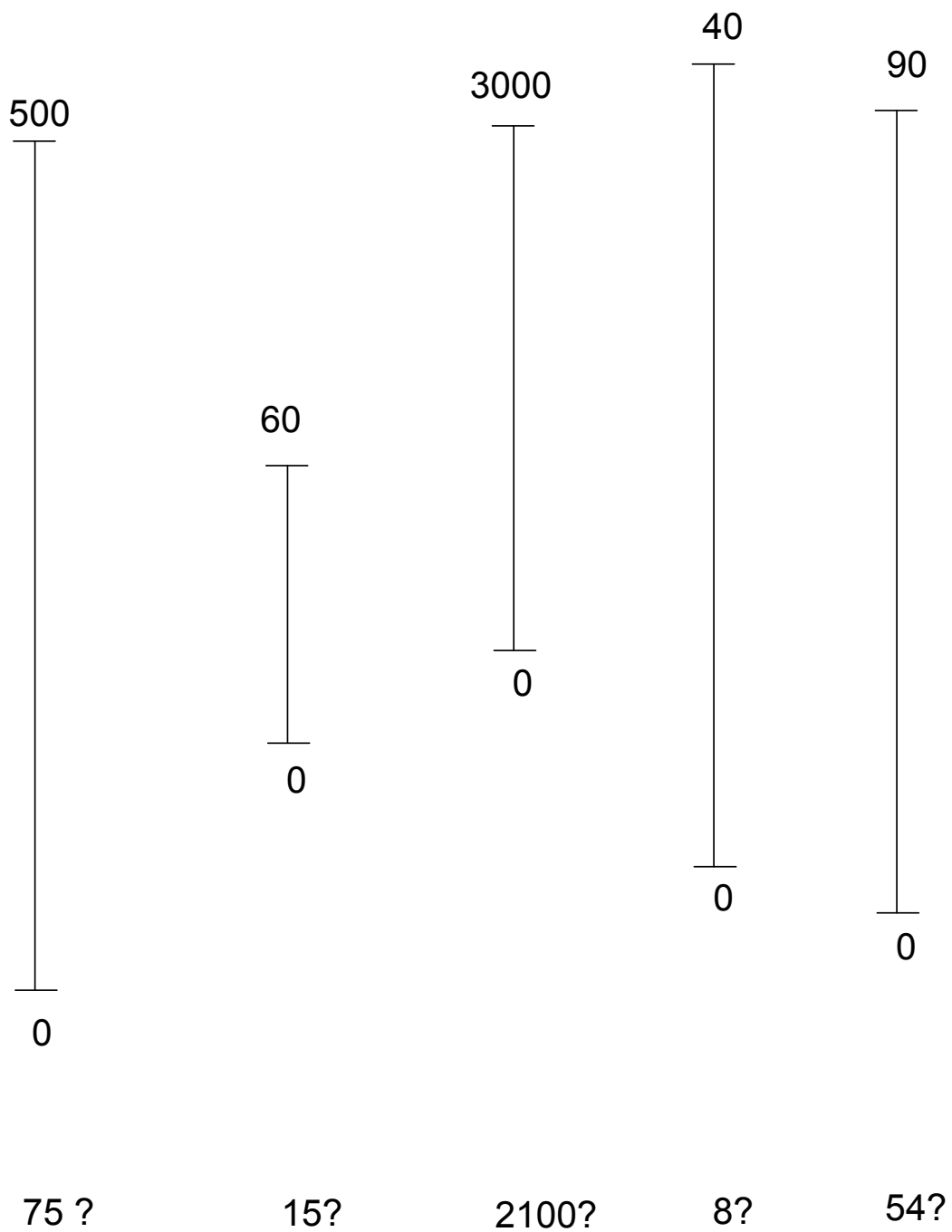


links: ☐ rechts: ☐

Und weiter geht es mit einer anderen kleinen Knobelaufgabe auf der nächsten Seite...



Bitte markiere mit einem kleinen, waagerechten Strich die Stelle an dem jeweiligen Zahlenstrahl, wo sich die darunter stehende Zahl von der Größe her befinden müsste.

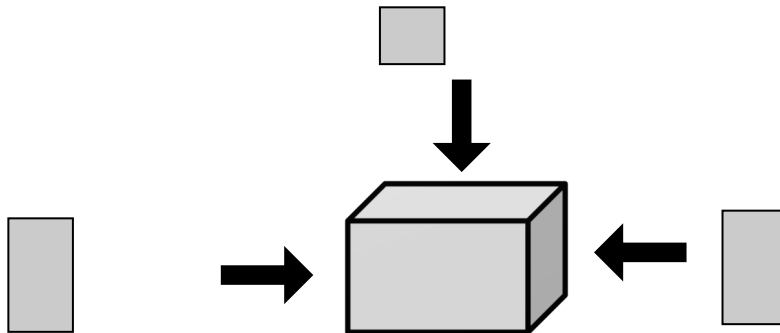


Bitte markiere mit einem kleinen, waagerechten Strich die Stelle an dem jeweiligen Zahlenstrahl, wo sich die darunter stehende Zahl von der Größe her befinden müsste.



Bei dieser Aufgabe geht es darum, sich die Schachteln von der richtigen Seite vorzustellen! Die Schachteln sind alle gleich groß, **unabhängig** von ihrer Färbung! Sie können bloß unterschiedlich herumliegen. Auf dem Gitternetz siehst du die gleich großen Schachteln von oben wie aus einem Hubschrauber. Rechts davon sind die Ansichten – von allen vier Seiten (A, B, C, D) her gesehen – gezeichnet. Schreibe in die Kästchen ganz rechts, welche der vier Ansichten zu welcher der vier Seiten passt. Schreibe den Buchstaben der zur Ansicht gehörenden Seite (A, B, C oder D) in das zugehörige Kästchen rechts daneben.

Damit du es dir besser vorstellen kannst, siehst du hier, wie eine einzige Schachtel von allen Seiten aussehen würde:

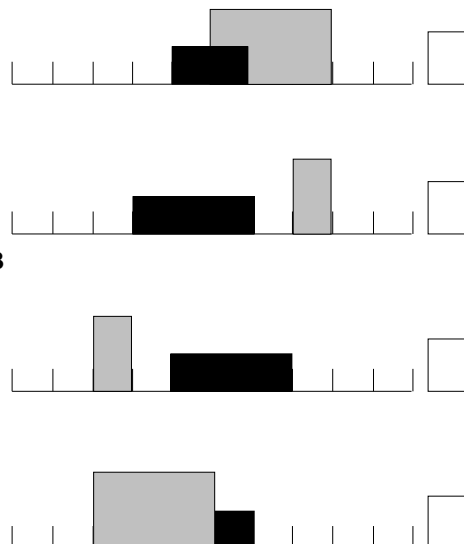
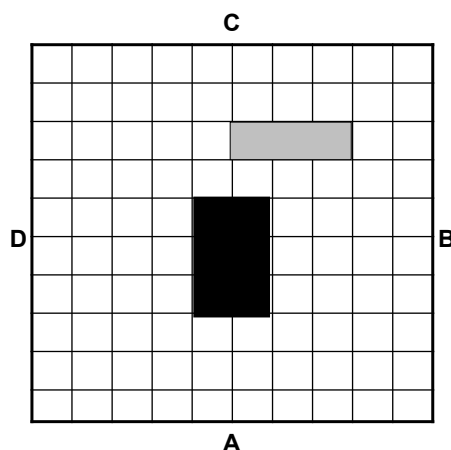


In diesem Fall geht es auch um die **Zeit**, die du für die **vier** Schachtel-Aufgaben benötigst. Schau also mal auf die Uhr und schreibe die aktuelle Zeit hier auf:

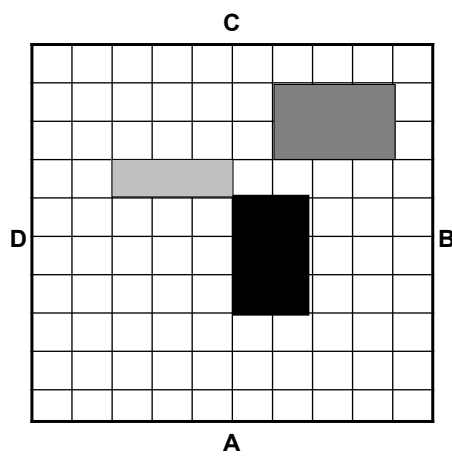
Es ist genau ..... Uhr. – Und jetzt auf die Plätze, fertig, los...!

Hier siehst du gleich große Schachteln von oben.

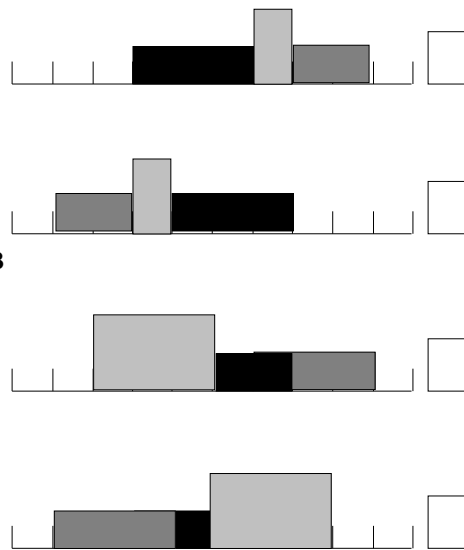
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du die Schachteln genau so wie unten gemalt?



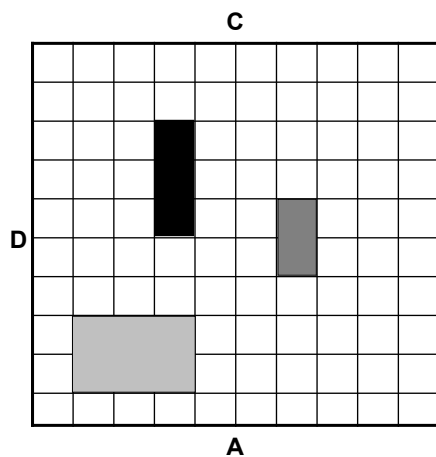
Hier siehst du gleich große  
Schachteln von oben.



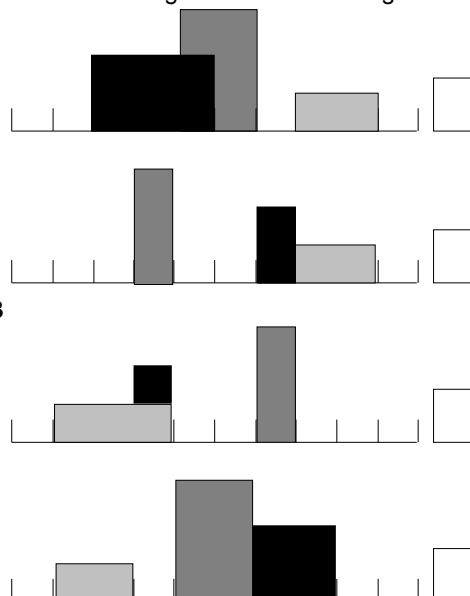
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du  
die Schachteln genau so wie unten gemalt?



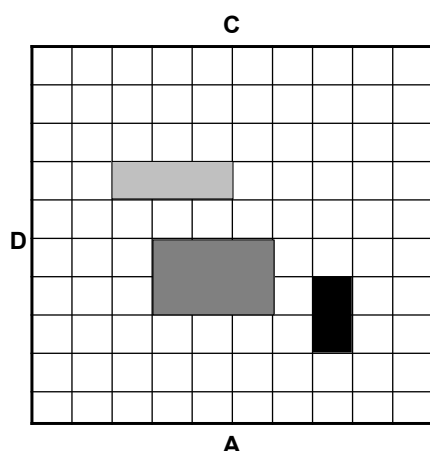
Hier siehst du gleich große  
Schachteln von oben.



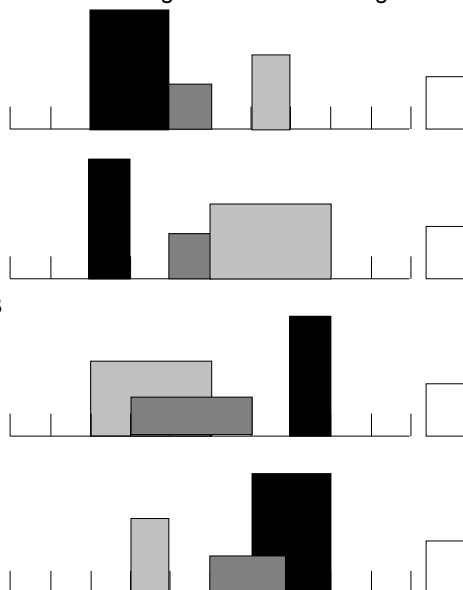
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du  
die Schachteln genau so wie unten gemalt?



Hier siehst du gleich große Schachteln von oben.



Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du die Schachteln genau so wie unten gemalt?



**Fertig mit den vier Schachtel-Aufgaben? – Dann schreibe hier wieder die aktuelle Zeit hin:**

Es ist jetzt ..... Uhr.

Wenn du magst, kannst du gerne auch die Zeit ausrechnen, die du für die Schachtel-Aufgabe benötigt hast:

Ich habe ..... Minuten gebraucht.

**Zum Schluss würden wir gerne noch wissen wie du selbst deine Bearbeitung des Fragebogens einschätzt. Bitte kreuze jeweils „Ja“ oder „Nein“ an!**

Ich habe mich bei der Bearbeitung des Fragebogens angestrengt und versucht, ihn so gut wie möglich zu bearbeiten.	Ja	Nein
Ich hätte mich mehr angestrengt, wenn ich dafür benotet worden wäre.	Ja	Nein
Ich war besonders aufgeregt bei den Aufgaben zum Vorstellungsvermögen.	Ja	Nein

**Vielen Dank für deine Mitarbeit!**

## Publikation

- Krick CM, Neuhaus A, Klewin C, Wörner T, Kreis S, Reith W (2015) fMRT und DTI bei Entwicklungsverzögerung der Zahlenverarbeitung. Der Radiologe

## Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, deren Unterstützung auf unterschiedlichste Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Zu aller Erst möchte ich mich bei meinen Probanden sowie deren Eltern für das großartige Engagement bedanken.

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Wolfgang Reith für die Hilfe bei der Auswahl der Thematik, für die Bereitstellung des Kernspintomographens und weiterer Materialien sowie die Finanzierung der T-Shirts für die Probanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr. rer. med. Christoph Krick für die unermüdliche Hilfe bei der Probandenrekrutierung, bei der eigentlichen Messung, bei der Bereitstellung seiner selbstgeschriebenen Programme, bei der statistischen Auswertung sowie der Diskussion und der Korrektur. Die optimale Betreuung durch ihn ist maßgeblich für den Erfolg dieser Arbeit.

Cordula Klewin und Axel Neuhaus möchte ich für die nette und konstruktive Zusammenarbeit innerhalb unserer Arbeitsgruppe danken.

Zu guter Letzt möchte ich mich herzlich bei Liselotte Preu und meiner Familie bedanken, die mir sowohl den nötigen Freiraum einräumten sowie diese Arbeit durch Ratschläge und Diskussionsbereitschaft bereicherten.